

ИЗМЕНЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ЛЬДА В АРКТИКЕ С КОНЦА XIX ВЕКА

д-р физ.-мат. наук **В.Ю.АЛЕКСАНДРОВ**^{1,2}, профессор **О.М.ЙОХАННЕССЕН**²

¹ – Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена (Фонд «Нансен-центр»), Санкт-Петербург, e-mail: Vitali.alexandrov@niersc.spb.ru

² – Nansen Environmental and Remote sensing Centre, Bergen, Norway, e-mail: ola.johannessen@nersc.no

В работе проанализированы изменения толщины ледяного покрова в Арктике с конца XIX века по настоящее время. В период общего потепления Арктики в начале XX века наблюдалось значительное уменьшение толщины льда в районе трансполярного дрейфа. По данным измерений, выполненных во время дрейфа «Фрама» и «Седова», уменьшение толщины льда зимой в 1937–1939 гг. по сравнению с 1893–1894 гг. составило примерно 25 %. В период похолодания Арктики в середине XX века происходило увеличение максимальной толщины припая. В последние десятилетия XX – начале XXI веков отмечалось уменьшение средней толщины льда в ряде районов Арктики, вызванное в значительной степени замещением многолетнего льда однолетним. Наибольшая скорость уменьшения толщины льда была зафиксирована в период 2003–2008 гг. В период 2007–2009 гг. значительных изменений толщины льда не наблюдалось. По-видимому, наиболее значительное уменьшение толщины льда произошло в Центральной Арктике, бассейне Нансена и проливе Фрама, а также в Восточной Арктике, в то время как к северу от Гренландии толщина льда практически не изменилась с 1980-х гг. вследствие торошения, вызванного особенностями крупномасштабной циркуляции льдов. Во второй половине XX века отмечалось уменьшение толщины припая на 0,11 м за десятилетие у острова Хопен в Баренцевом море. В евразийских арктических морях и Канадской Арктике значительного уменьшения толщины припая не было выявлено.

Ключевые слова: толщина льда, дрейфующий лед, припай, Арктика.

ВВЕДЕНИЕ

Распределение льдов по возрасту в значительной степени обусловлено основными особенностями их дрейфа, а именно антициклоническим дрейфом льдов в районе моря Бофорта и трансарктическим дрейфом [Гудкович, Доронин, 2001]. Льды, вовлеченные в антициклонический круговорот, могут находиться в нем до 10–12 лет, вследствие чего частная сплоченность многолетних льдов в приполюсном и канадско-гренландском районах превышает 80 %. В районе трансполярного дрейфа частная сплоченность многолетних льдов уменьшается от более чем 50 % в Арктическом бассейне и северной части Восточно-Сибирского моря до 10 % на границах евразийских арктических морей [Мионов, 1985]. Анализ измерений осадки льда, проводившихся с 1958 г. при помощи сонаров, установленных на атомных подводных лодках (АПЛ) США и Великобритании, выявил ее возрастание от морей Российской Арктики до 3–4 м в районе полюса и далее до 7–8 м у северного побережья Гренландии и Канадской Арктики [Bourke, Garrett, 1987]. Отсутствие измерений осадки льда на шельфе арктических морей было восполнено данными измерений, проводившихся с середины XX века в Высокоширотных воздушных экспедициях «Север» [Romanov, 1995], а также данными авиационных ледовых разведок в евразийских арктических

морях [Бузуев и др., 1988]. В результате этих исследований было установлено, что в конце зимы лед нарастает в среднем до 1,80–2,40 м в районе к северу от Земли Франца-Иосифа, до 1,40–1,60 м – в Новоземельском и до 2,00 м – в Североземельском массивах, до 1,80–2,40 м, 1,40–1,60 м и 1,60–1,80 м – в северной, западной и восточной частях моря Лаптевых соответственно. В Айонском массиве максимальная толщина ровного однолетнего льда составляет 1,85–1,95 м, а многолетнего льда – 3–4 м [Бузуев и др., 1988].

Средние толщины многолетнего, двухлетнего и однолетнего льдов в западной части Канадской Арктики (восточная часть Чукотского моря и море Бофорта) составили 3,00, 2,60, и 2,20 м соответственно, а однолетнего льда в восточной части Канадской Арктики (море Баффина и пролив Дэвиса) – 1,40 м [Бузуев и др., 1988]. В проливах Канадского Арктического архипелага возможно существование припая возрастом более четырех лет, достигающего толщины порядка 6–10 м [Walker, Wadhams, 1979]. В конце зимнего периода в проливе Свердруп средняя толщина припая достигает $2,20 \pm 0,50$ м, а многолетнего припая – 3,40 м [Melling, 2002].

Период общего потепления Арктики, продолжавшийся до конца 1930-х гг. и обусловленный главным образом природной изменчивостью климатической системы, сопровождался изменениями характеристик ледяного покрова. В 1920–1930 гг. площадь льдов в районе, охватывающем 77 % площади Северного Ледовитого океана, уменьшилась на $0,6 \cdot 10^6$ км² [Johannessen et al., 2004]. С середины 1940-х гг. в Арктике началось похолодание, происходившее до конца 1970-х гг., которое сменилось потеплением, продолжающимся в настоящее время. Основной задачей данного исследования является анализ изменений толщины льда в Арктике в различные климатические периоды с конца XIX века.

ИЗМЕНЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ЛЬДА В ПЕРИОД ПОТЕПЛЕНИЯ В НАЧАЛЕ XX ВЕКА

В первой половине XX века эпизодические измерения толщины дрейфующего льда проводились в полярных экспедициях, а регулярные измерения толщины припайного льда на полярных станциях начались в середине 1930-х гг. Одной из немногих возможностей оценить изменения толщины льда в период потепления начала XX века является сравнение измерений, регулярно выполнявшихся экспедициями «Фрама» и «Седова». Осенью 1893 г. «Фрам» вмерз в лед в море Лаптевых и начал

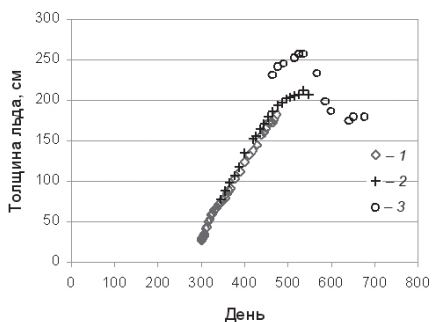


Рис. 1. Изменение толщины однолетнего льда по данным измерений во время дрейфа «Фрама» (зима–лето 1893–1894 г. (3)) и дрейфа ледокола «Седов» (зимы 1937/38 (1) и 1938/39 (2) гг.) в зависимости от порядкового номера дня в году. Порядковый номер дня в году для каждого из рассматриваемых периодов отсчитывался с первого января 1893, 1937 и 1938 гг. соответственно.

свой легендарный дрейф. Более чем через сорок лет, осенью 1936 г., ледокол «Седов», зажатый льдами в море Лаптевых, повторил в общих чертах дрейф «Фрама». В этих экспедициях проводились регулярные измерения толщины вновь образовавшегося и старого льдов на специальных полигонах [Nansen, 1897; Буйницкий, 1951]. Оба судна дрейфовали в окружении полей старого льда, вследствие чего условия нарастания вновь образовавшегося льда были приблизительно одинаковыми. Графики изменения толщины однолетнего льда зимой–летом 1893–1894 гг., зимой 1937/38 г. и зимой 1938/39 г. в зависимости от порядкового номера дня в году представлены на рис. 1. Лед, образовавшийся в октябре–ноябре 1893 г., достиг максимальной толщины 2,58 м в начале июня 1894 г. (рис. 1). В октябре 1894 г. нарастание этого поля продолжилось, и к маю 1895 г. его толщина увеличилась до 2,95 м [Nansen, 1897].

Лед, образовавшийся вблизи «Седова» в октябре 1937 г., достиг максимальной толщины 1,95 м в начале июня 1938 г. (рис. 1). В июне 1939 г. однолетний лед достиг максимальной толщины 2,07 м, двухлетний – 2,05 м, а трехлетний лед – 2,22 м [Буйницкий, 1951].

Таким образом, максимальная толщина однолетнего льда в районе моря Лаптевых и прилегающей части Северного Ледовитого океана в период с 1893–1894 по 1937–1939 гг. уменьшилась примерно на 25 %. Анализ данных метеорологических наблюдений, проводившихся во время дрейфа обоих судов, показал, что число градусо-дней мороза, составившее 6287, 7037 и 6228 в периоды измерения толщин льда в 1893/94, 1894/95 и 1895/96 гг., уменьшилось до 4732 зимой 1937/38 г., или примерно на треть. По данным Зубова [1945], среднегодовая температура во время дрейфа «Седова» была на 4,1 °С выше, чем во время дрейфа «Фрама», а средняя температура в период с сентября по февраль – выше на 7,5 °С.

ИЗМЕНЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ЛЬДА В ПЕРИОД ПОХОЛОДАНИЯ В СЕРЕДИНЕ XX ВЕКА

Начиная с середины 1940-х гг. потепление в Арктике сменилось похолоданием, продолжавшимся до конца 1970-х гг. Максимальная толщина припайного льда увеличивалась с 1936 г. до конца 1960-х гг., после чего стала уменьшаться [Фролов и др., 2007]. В работе [Polyakov et al., 2002] выявлен положительный тренд изменения толщины припая в морях Карском, Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском в период 1940–1973 гг., который составил 0,0035 м/год. По данным работы [Захаров, 1976] похолодание в Арктике не было повсеместным, а в районах к востоку от Медвежьих островов имело место увеличение температуры воздуха. В результате в конце 1960-х гг. средняя толщина припая в Карском море увеличилась на 0,30 м, в море Лаптевых – на 0,07 м, а в Восточно-Сибирском море уменьшилась на 0,04 м.

ИЗМЕНЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ЛЬДА В ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ XX – НАЧАЛЕ XXI ВЕКА

Изменения толщины морского льда в Арктике во второй половине XX – начале XXI в. рассматривались в ряде исследований. В работе [Rothrock et al., 1999] оценивались изменения осадки льда по данным ее измерений при помощи сонаров на АПЛ, выполненных в пределах области площадью 2700000 км², что составляет около 38 % площади Северного Ледовитого океана (рис. 2).

Средняя осадка льда в конце периода таяния уменьшилась с 3,1 м в 1958–1976 гг. до 1,8 м в период 1993–1997 гг., или на 40 %, а в период 1993–1997 гг. – с 2,0 до 1,6 м.

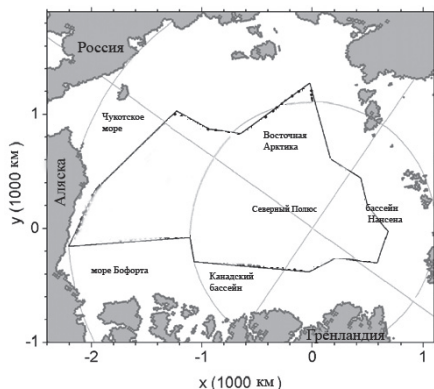


Рис. 2. Границы области, в пределах которых производились измерения осадки льда с АПЛ США и районы Арктики, для которых оценивались измерения толщины льда.

По данным восьми плаваний, выполненных в период с 1987 по 1997 г., осадка льда в этот период уменьшалась на 0,16 м/г. зимой и на 0,11 м/г. – летом [Rothrock et al., 2003]. Это означает, что отмеченное выше уменьшение толщины льда на 1,3 м происходило преимущественно в период с конца 1980-х и 1990-х гг. В работе [Rothrock et al., 2008] выявлено уменьшение средней за год осадки льда с 3,42 м в 1980 г. до 2,29 м в 2000 г.

В период 2003–2008 гг. из-за резкого сокращения количества измерений с АПЛ изменения толщины льда в пределах выделенной области проводились по данным ICESat для зимнего (февраль–март) и осеннего (октябрь–ноябрь) периодов [Kwok, Rothrock, 2009]. Было выявлено уменьшение средней толщина льда в конце лета с 2,8 м в 1980 г. до 1,15 м в 2007 г., а максимальной толщины льда в зимний период с 3,64 м в 1980 г. до 1,89 м в 2008 г., или на 48 %. В период 2003–2008 гг. средняя толщина льда уменьшалась на 0,20 м-год⁻¹ в осенний и 0,17 м-год⁻¹ в зимний периоды [Kwok, Rothrock, 2009]. По данным [Kwok et al., 2009] уменьшение толщины льда в 2003–2008 гг. было обусловлено в основном уменьшением толщины многолетнего льда, в то время как в зоне однолетнего льда она осталась на уровне 1,4 м осенью и 2,1 м зимой.

В период 2004–2008 гг. площадь однолетнего льда увеличилась, в то время как площадь многолетнего льда уменьшилась на 1 540 000 км², или на 42 %. Уменьшение площади многолетнего льда было более значительное, чем в период 1978–1998 гг., когда оно составило 14 % [Johannessen et al., 1999]. Объем льда в 2004–2008 гг. уменьшился на 5400 (42 %) осенью и 3500 км³ (21 %) зимой. При этом большее уменьшение объема многолетнего льда было частично компенсировано увеличением объема однолетнего льда вследствие увеличения его площади. В этот период однолетний лед стал преобладающим в Арктике. Результаты изменений осадки льда в центральной части Арктики со второй половины XX в. представлены в табл. 1.

Измерения, выполненные летом 2007 г. во время трансарктического рейса АПЛ от Шпицбергена до Аляски, показали уменьшение средней осадки льда на 40 % по сравнению с 1970-ми гг. [Anderson, 2009].

Изменения средней толщины льда в Центральном Арктическом бассейне рассчитывались с использованием метода, основанного на экспериментальном определении осредненной частоты волн зыби и изгибно-гравитационных волн во льдах

Изменения осадки льда в границах области, выделенной на рис. 2

Период	Начало периода	Конец периода	Тренд, м/г	Ссылка
С 1958–1976 гг. по 1993–1997 гг., лето	3,1 м	1,8 м	–0,046	Rothrock et al., 1999
С 1993 по 1997 г., лето	2,0 м	1,6 м	–0,100	Rothrock et al., 1999
С 1987 по 1997 г., зима*	–	–	–0,160	Rothrock et al., 2003
С 1987 по 1997 г., лето*	–	–	–0,110	Rothrock et al., 2003
С 1980 по 2000 г.	3,42 м	2,29 м	–0,057	Rothrock et al., 2008
С 1980 по 2007 г., лето	2,8 м	1,15 м	–0,061	Kwok, Rothrock, 2009
С 1980 по 2007 г., зима	3,64 м	1,89 м	–0,065	Kwok, Rothrock, 2009
С 2003 по 2007 г., лето*	–	–	–0,200	Kwok, Rothrock, 2009
С 2003 по 2007 г., зима*	–	–	–0,170	Kwok, Rothrock, 2009

Примечание. * – данные по началу и концу периода отсутствуют в первоисточнике.

на дрейфующих станциях «Северный полюс» [Нагурный и др., 2003]. В период 1970–1990 гг. средняя толщины льда по этим данным уменьшилась на 0,10 м, и наибольшее уменьшение отмечено в 1987–1990 гг.

Значительный интерес представляет изучение изменений толщины льда в различных частях Северного Ледовитого океана. По данным работы [Rothrock et al., 1999], в зимний период осадка льда в районе Северного полюса уменьшилась с 3,8 м в 1958–1976 гг. до 2,4 м в 1993–1997 гг., или примерно на 37 %. При этом с 1993 по 1997 г. наблюдалось незначительное увеличение осадки льда на 0,01 м/г. В ряде других исследований в районе Северного полюса не было выявлено уменьшения осадки льда в периоды 1958–1992 гг. [McLaren et al., 2004], с 1977 по 1992 г. [Shy, Walsh, 1996], с 1986 по 1997 г. [Winsor, 2001] и с середины 1980-х гг. до 1990-х гг. [Tucker et al., 2001]. При этом, несмотря на значительные межгодовые изменения, средние значения осадки льда, приводимые этими авторами для соответствующих периодов, лишь незначительно отличаются от значения 3,8 м, полученного в работе [Rothrock et al., 1999] в 1958–1976 гг. В период между 2001 и 2007 гг. в районе Северного полюса выявлено уменьшение моды и среднего значения толщины льда на 53 % и 44 % соответственно, обусловленное, главным образом, замещением старого льда однолетним [Haas et al., 2008]. В период с апреля 2007 г. по апрель 2009 г. мода толщины льда на Северном полюсе возросла с 2,4 м до 2,8 м [Haas et al., 2010].

На разрезе от Северного полюса к морю Бофорта вдоль 150° з.д. осадка льда в конце лета уменьшилась с 2,2 м в 1993 г. до 1,7 м в 1997 г. [Rothrock et al., 2003]. В апреле–мае с 1991 по 1997 г. осадка льда на этом разрезе оставалась практически без изменений [Winsor, 2001]. Анализ данных 9 рейсов, выполненных вдоль данного разреза в апреле (один в 1976 г., остальные – между 1986 и 1994 гг.), которые не рассматривались в работе [Rothrock et al., 1999], выявил уменьшение средней осадки льда в районе между 73 и 89° с.ш. с 4,77 м в 1986–1987 гг. до 3,25 м в 1990-х гг. [Tucker et al., 2001]. При этом с середины 1970-х гг. до конца 1980-х гг. толщина льда увеличивалась, после чего последовало ее уменьшение.

Осадка льда в Чукотском море и море Бофорта уменьшилась с 2,1 м в 1958–1976 гг. до 1,2 м в 1993–1997 гг., или примерно на 43 % [Rothrock et al., 1999]. В период с 1993 по 1997 г. толщина льда в море Бофорта уменьшалась на 0,14 м/г, а в Чукотском море незначительно увеличивалась на 0,01 м/г. В работе [Winsor, 2001] также

выявлено уменьшение толщины льда, но незначительное в море Бофорга в период 1991–1997 гг. В период 2007–2009 гг. мода толщины однолетнего льда в Чукотском море изменялась незначительно [Haas et al., 2008].

В работе [Rothrock et al., 1999] было выявлено уменьшение осадки льда в Канадском бассейне с 3,5 м в 1958–1976 гг. до 2,2 м в 1993–1997 гг., или примерно на 37 %, а также ее уменьшение с 1993 по 1997 г. на 0,17 м/г. В то же время в работе [Hughes, Wadhams, 2006] в районе к северу от Гренландии отмечается отсутствие изменений осадки льда с 1980-х гг. вследствие торошения, вызванного особенностями крупномасштабной циркуляции льдов. Так, на разрезе вдоль 85° с.ш. осадка льда в апреле 2004 г. была больше, чем в апреле 1987 г. В период с апреля 2007 г. по апрель 2009 г. мода толщины льда в районе севернее о. Элмир восстановилась до 4,3 м [Haas et al., 2008].

Оценки, выполненные в работе [Rothrock et al., 1999], показали уменьшение осадки льда в бассейне Нансена с 3,9 м в 1958–1976 гг. до 2,2 м в 1993–1997 гг., или примерно на 43 %. Увеличение осадки льда в этом районе на 0,17 м/г с 1993 по 1996 г. основывается на ограниченном ряде данных. По данным измерений, выполненных в конце лета между Шпицбергом и Северным полюсом в 1991, 1996, 1998 и 2001 гг., средняя толщина льда в этом районе уменьшилась на 22 % с $3,11 \pm 1,03$ м в 1991 г. до $2,41 \pm 0,98$ м в 2001 г., а среднее значение моды толщины с $2,72 \pm 0,69$ м в 1991 г. до $1,99 \pm 0,30$ м в 2001 г. При этом с 1991 по 1996 г. средняя толщина льда не изменилась, а среднее значение моды уменьшилось на 0,38 м [Haas, 2004]. В районе между 83°30' и 84°30' с.ш. и между 0° и 10° в.д. средние значения осадки льда изменялись незначительно от 4,6 м в 1976 г. до 4,75 м – в 1979 г. и 4,85 м – в 1985 г., однако эти измерения производились в различное время года [Wadhams, 1994]. В то же время сравнение данных измерений, выполненных в 1976, 1979, 1985 и 1987 гг. в районе к северу от пролива Фрама между 82° и 80° с.ш., показало уменьшение средней осадки льда на 15 % [Wadhams, 1994]. В районе, ограниченном 81 и 90° с.ш. и 5° з.д. и 5° в.д., средняя осадка льда в сентябре уменьшилась с 1976 по 1996 г. на 43,2 % [Wadhams, Davis, 2000].

Средняя осадка льда в Восточной Арктике уменьшилась с 3,3 м в 1958–1976 гг. до 1,5 м в 1993–1997 гг. [Rothrock et al., 1999]. Оценка уменьшения осадки льда на 0,28 м/г с 1993 по 1997 гг. основывается на ограниченном числе измерений [Rothrock et al., 2003].

Оценки изменения толщины льда выполнялись в ряде районов Восточной Арктики. В море Лаптевых мода и среднее значение толщины однолетнего льда летом 1995 г. превышали значения, полученные в 2007 г., на 28 % и 30 % соответственно [Haas et al., 2008]. На разрезе от моря Лаптевых к Северному полюсу средняя толщина льда уменьшилась с 1,86 м в августе 1977 г. до 1,42 м в августе 2005 г. вследствие значительного уменьшения протяженности пути в старых льдах. При этом средняя

Таблица 2

Изменения осадки льда в бассейне Нансена и проливе Фрама

Период	Начало периода	Конец периода	Тренд, м/год	Ссылка
С 1958–1976 гг. по 1993–1997 гг., лето	3,9 м	2,2 м	-0,061	Rothrock et al., 1999
С 1976 по 1985 г.	4,6 м	4,85	нет	Wadhams, 1994
С 1976 по 1996 г., лето	4,82 м	2,74 м	-0,104	Wadhams, Davis, 2000
С 1991 по 2001 г.	$3,11 \pm 1,03$ м	$2,41 \pm 0,98$ м	-0,070	Haas, 2004
С 1993 по 1996 г., лето	2,1	2,6	0,167	Rothrock et al., 1999

толщина однолетних льдов не изменилась, а толщина старых льдов уменьшилась на 0,13 м [Фролов и др., 2009]. На разрезе между Землей Франца-Иосифа и Северным полюсом средняя толщина льда уменьшилась с 1,8 м в мае 1987 г. до 1,38 м в мае 2006 г., т.е. на 23 %, главным образом, вследствие уменьшения доли старых льдов с 36 % до 13 %. Толщины отдельно взятых однолетних и старых льдов уменьшились незначительно: на 0,15 м (10 %) и 0,16 м (6 %) соответственно [Фролов и др., 2009]. В летний период в 2006–2009 гг. средняя толщина льда на этом разрезе уменьшилась по сравнению с 1990 гг., при этом максимальное уменьшение было зафиксировано в 2007 г. – 34 % в июле и 42 % в августе. В летний период 2008 и 2009 гг. средняя толщина льда по сравнению с летом 2007 г. практически не изменилась. В 2006–2009 гг. наибольшее изменение толщины наблюдалось у ровных однолетних льдов – до 21 %, тогда как у старых льдов оно составило 7–13 % [Фролов и др., 2011].

Таблица 3

Изменения осадки льда в Восточной Арктике

Период	Начало периода	Конец периода	Тренд, м/год	Ссылка
С 1958–1976 гг. по 1993–1997 гг., лето	3,3 м	1,5 м	–0,064	Rothrock et al., 1999
С 1976 по 1987 г.	1,8 м	1,38 м	–0,038	Фролов и др., 2009
С 1977 по 2005 г.	1,86 м	1,42 м	–0,016	Фролов и др., 2009
С 1990–2004 гг. по 2006–2008 гг.	2,0 м	1,21 м	–0,079	Фролов и др., 2009
С 1991–1996 гг. по 2006–2009 гг.	1,88 м	1,25 м	–0,045	Фролов и др., 2011
С 1993 по 1997 г., лето	2,1 м	0,8 м	–0,280	Rothrock et al., 1999
С 1995 по 2007 г.	3,11 ± 1,03 м	2,41 ± 0,98 м	–0,058	Haas, 2004

ИЗМЕНЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ПРИПАЯ

Изменения толщины припайного льда во второй половине XX в. были проанализированы в ряде районов Арктики. Статистически значимый тренд, показывающий уменьшение толщины припайного льда у о. Хопен в период 1966–2007 гг. на 0,11 м за десятилетие, обусловлен увеличением температуры воздуха на 0,85 °С/десятилетие и морской воды на 0,36 °С/десятилетие [Gerland et al., 2008].

В период 1936–2000 гг. не было выявлено устойчивой тенденции изменения толщины припая в Карском, Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях – тренды были относительно невелики и статистически незначимы по уровню 95 %. В период 1973–2000 гг. выявлен отрицательный тренд (–0,0052 м/г.) изменения толщины льда [Polyakov et al., 2002].

Нами были проанализированы изменения толщины припая в центральной части Евразийской Арктики по данным измерений в высокоширотных воздушных экспедициях «Север». Анализ моды 0,20-метрового интервала распределения толщины льда выявил ее значительную межгодовую изменчивость в период 1960-х – 1980-х гг. в районах: 1) пролив Вилькицкого и западная часть моря Лаптевых; и 2) восточная часть моря Лаптевых – западная часть Восточно-Сибирского моря, и отсутствие значимых трендов [Бобылев и др., 2011].

Межгодовая изменчивость средней толщины припая в бассейне Свердруп пре-вышает 1 м, а наиболее вероятным фактором, определяющим ее изменения, являются межгодовые изменения высоты снега [Melling, 2002]. В 1970-х гг. средняя толщина

однолетнего припая в этом районе увеличилась на 0,25 м в марте, на 0,02 м в апреле и на 0,09 м в мае. Анализ изменения толщины припая в период 1947–1998 гг. на 13 станциях в Канадской Арктике выявил потепление климата и уменьшение толщины льда, которое ускорилось в 1990-е гг. [Drews, 2003]. Незначительное похолодание наблюдалось на северо-восточном побережье Канады, прилегающем к Баффинову заливу, проливу Дэвиса и Лабрадорскому морю.

Авторами данной статьи изучались изменения толщины припая на шести полярных станциях в Канадской Арктике, измерения на которых производились непрерывно с конца 1950-х гг. по 2010 г. Анализ межгодовых изменений максимальных значений толщины припая в каждом сезонном цикле выявил незначительный отрицательный тренд на станциях Алерт YLT (–0,002 м/г.), Кембридж (–0,003 м/г.), и Икалуит (–0,002 м/г.), и несколько больший – на станциях Алерт LT1 и Инувик (–0,007 м/г.). На станции Резолют отмечено увеличение толщины льда, в среднем на 0,003 м/г. (рис. 3).

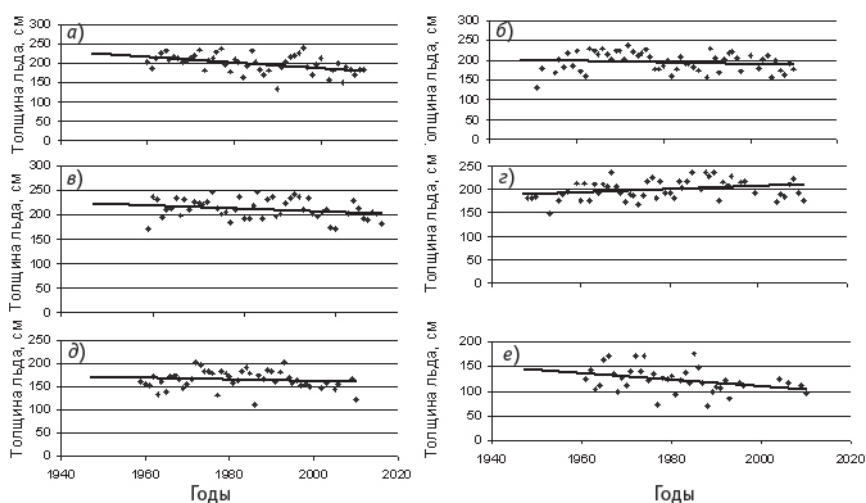


Рис. 3. Изменения максимальной толщины, достигаемой припаем в каждом сезонном цикле его нарастания в период с конца 1950-х гг. по 2010 г. по данным измерений на канадских полярных станциях: а) Алерт (LT1), б) Алерт (YLT), в) Кембридж, г) Резолют, д) Икалуит, е) Инувик.

ВЫВОДЫ

В период потепления Арктики в начале XX в. наблюдалось значительное уменьшение толщины льда в районе трансполярного дрейфа. По данным измерений, выполненных во время дрейфа «Фрама» и «Седова», толщина льда в зимний период уменьшилась на 25 % в 1937–1939 гг. по сравнению с 1893–1894 гг. В этот же период число градусо-дней мороза в районе дрейфа судов уменьшилось примерно на треть. В период похолодания Арктики в середине XX в. происходило увеличение максимальной толщины припая. В последние десятилетия XX – начале XXI в. отмечается уменьшение средней толщины льда, главным образом, вследствие уменьшения площади многолетнего льда и его замещения однолетним льдом. Наибольшая скорость уменьшения средней толщины льда была зафиксирована в период 2003–2008 гг. С 2007 по 2009 г. значительных изменений толщины льда не наблюдалось. По-видимому, наи-

более значительное уменьшение толщины льда произошло в Центральной Арктике, бассейне Нансена и проливе Фрама, а также в Восточной Арктике. В районе к северу от Гренландии осадка льда не изменилась с 1980-х гг. вследствие торошения, вызванного особенностями крупномасштабной циркуляции льдов. Анализ изменений толщины припая, выполненный по данным измерений в районе Баренцева моря, евразийских арктических морей и Канадской Арктики, выявил устойчивое уменьшение толщины припайного льда на 0,11 м за десятилетие в районе о. Хопен. Значительного уменьшения толщины припая в Евразийских арктических морях и Канадской Арктике не наблюдалось, а в отдельных случаях происходило ее увеличение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бобылев Л.П., Йоханнессен О.М., Шалина Е.В., Александров В.Ю., Сандвен С.* Изменение ледяного покрова Северного Ледовитого океана в конце 20-го – начале 21-го веков по данным спутникового зондирования и других видов измерений // *Океанография и морской лед* / Под ред. И.Е.Фролова. М.; СПб.: ООО Паулсен, 2011. С. 338–356.
- Буйницкий В.Х.* Формирование и дрейф ледяного покрова в Арктическом бассейне // *Труды дрейфующей экспедиции на л/п «Г.Седов», 1937–1940.* М.; Л.: Изд-во Главсевморпути, 1951. Т. 4. С. 74–151.
- Бузуев А.Я., Дубовцев В.Ф., Захаров В.Ф., Смирнов В.И.* Условия плавания судов во льдах морей Северного полушария. М.: ГУНИО, 1988. 277 с.
- Гудкович З.М., Доронин Ю.П.* Дрейф морских льдов. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 112 с.
- Захаров В.Ф.* Похолодание Арктики и ледяной покров арктических морей // *Тр. ААНИИ.* 1976. Т. 337. С. 1–95.
- Зубов Н.Н.* Льды Арктики. М.: Изд-во Главсевморпути, 1945. 360 с.
- Мионов Е.У.* Крупномасштабная изменчивость толщины льда в Арктическом бассейне и прилегающих морях: Дис. ... канд. геогр. наук. Л.: ААНИИ, 1985. 152 с.
- Нагурный А.П., Коростелев В.Г., Йоханнессен О.М., Медведченко Е.Ю.* Межгодовая тенденция изменения толщины морского льда в Арктическом бассейне в 1970–1990 гг. // *Тр. ААНИИ.* 2003. Т. 446. С. 83–98.
- Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М.* Научные исследования в Арктике. Т. 2. Климатические изменения ледяного покрова морей Евразийского шельфа. СПб.: Наука, 2007. 135 с.
- Фролов С.В., Федяков В.Е., Третьяков В.Ю., Клейн А.Е., Алексеев Г.В.* Новые данные об изменениях толщины льда в Арктическом бассейне // *Доклады Академии наук.* 2009. Т. 425. № 1. С. 104–108.
- Фролов С.В., Третьяков В.Ю., Клейн А.Е., Алексеева Т.А., Пряхин С.С.* Результаты наблюдений за толщиной ледяного покрова, выполненных во время высокоширотных арктических морских экспедиций // *Океанография и морской лед* / Под ред. И.Е.Фролова. М.; СПб.: ООО Паулсен, 2011. С. 374–384.
- Anderson A.* After the ice. Life, death and politics in the new Arctic. London: Virgin books, 2009. 304 p.
- Bourke R.H., Garrett R.P.* Sea ice thickness distribution in the Arctic Ocean // *Cold Regions Science and Technology.* 1987. Vol. 13. № 3. P. 259–280.
- Drews C.* Detecting Climate Change in Canadian Ice Data // Final research paper for METO 1160-C. 2003. URL: <http://www.highestlake.com/> [дата обращения 12.09.2012]
- Gerland S., Renner A.H.H., Godtliebsen F., Divine D., Loyning T.B.* Decrease of sea ice thickness at Hopen, Barents Sea, during 1966–2007 // *Geophysical Research Letters.* 2008. Vol. 35. L06501. doi:10.1029/2007GL03271.

- Haas C.* Late-summer sea ice thickness variability in the Arctic Transpolar Drift 1991–2001 derived from ground-based electromagnetic sounding // *Geophysical Research Letters*. 2004. Vol. 31. L09402, doi:10.1029/2003GL019394.
- Haas C., Pfaffling A., Hendricks S., Rabenstein L., Etienne J.-L., Rigor I.* Reduced ice thickness in Arctic Transpolar Drift favours rapid ice retreat // *Geophysical Research Letters*. 2008. Vol. 35. L17501, doi:10.1029/2008GL034457.
- Haas C., Hendricks S., Eicken H., Herber A.* Synoptic airborne thickness surveys reveal state of Arctic sea ice cover // *Geophysical Research Letters*. 2010. Vol. 37. L09501, doi:10.1029/2010GL042652.
- Hughes N.E., Wadhams P.* Measurement of Arctic sea-ice thickness by submarine 5 years after SCICEX // *Annals of Glaciology*. 2006. Vol. 44. P. 200–204.
- Johannessen O. M., Shalina E.V., Miles M.W.* Satellite evidence for an Arctic sea ice cover in transformation // *Science*. 1999. Vol. 286. P. 1937–1939.
- Johannessen O.M., Bengtsson L., Miles M.W., Kuzmina S.I., Semenov V.A., Alekseev G.V., Nagurny A.P., Zakharov V.F., Bobylev L.P., Pettersson L.H., Hasselmann K., Cattle H.P.* Arctic climate change-observed and modelled temperature and sea ice // *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2004. Vol. 56A. № 4. P. 328–341.
- Kwok R., Rothrock D.A.* Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958–2008 // *Geophysical Research Letters*. 2009. Vol. 36. L15501, doi:10.1029/2009GL039035.
- Kwok R., Cunningham G.F., Wensnahan M., Rigor I., Zwally H.J., Yi D.* Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003–2008 // *Journal of Geophysical Research*. 2009. Vol. 114. C07005, doi:10.1029/2009JC005312.
- McLaren A.S., Bourke R.H., Walsh J.E., Weaver R.L.* Variability in Sea-Ice Thickness Over the North Pole From 1958 to 1992 // *Geophysical Monograph* 85, O.M. Johannessen, R.D. Muench, J.E. Overland, eds. Washington: American Geophysical Union, 1994. P. 363–371.
- Melling H.* Sea ice of the northern Canadian Arctic Archipelago // *Journal of Geophysical Research*. 2002. Vol. 107(C11). 3181. doi:10.1029/2001JC001102.
- Nansen F.* Farthest North. The Norwegian Polar Expedition, 1893–1896. Westminster: Archibald Constable and company, Whitehall Gardens, 1897. Vol. 1. 510 p.; Vol. 2. 671 p.
- Polyakov I.V., Alekseev G.V., Bekryaev R.V., Bhatt U., Colony R.L., Johnson M.A., Karklin V.P., Makshtas A.P., Walsh D., Yulin A.V.* Observationally based assessment of polar amplification of global warming // *Geophysical Research Letters*. 2002. Vol. 29(18). doi:10.1029/2001GL011111.
- Romanov I.P.* Atlas of ice and snow of the Arctic Basin and Siberian Shelf seas. Backbone Publishing Company, 1995. 277 p.
- Rothrock D.A., Yu Y., Maycut G.A.* Thinning of the Arctic Sea-Ice Cover // *Geophysical Research Letters*. 1999. Vol. 26 (23). P. 3469–3472.
- Rothrock D.A., Zhang J., Yu Y.* The arctic ice thickness anomaly of the 1990s: A consistent view from observations and models // *Journal of Geophysical Research*. 2003. Vol. 108(C3). 3083, doi:10.1029/2001JC001208.
- Rothrock D.A., Percival D.B., Wensnahan M.* The decline in arctic sea-ice thickness: Separating the spatial, annual, and interannual variability in a quarter century of submarine data // *Journal of Geophysical Research*. 2008. Vol. 113. C05003, doi:10.1029/2007JC004252.
- Shy T.L., Walsh J.E.* North Pole ice thickness and association with ice motion history 1977–1992 // *Geophysical Research Letters*. 1996. Vol. 23. № 21. P. 2975–2978.
- Tucker III W.B., Weatherly J.W., Eppler D.T., Farmer L.D. et al.* Evidence for rapid thinning of sea ice in the western Arctic at the end of the 1980s // *Geophysical Research Letters*. 2001. Vol. 28(14). P. 2851–2854.

Wadhams P. Sea ice thickness changes and their relation to climate // Geophysical Monograph 85, O.M. Johannessen, R.D. Muench, J.E. Overland, eds. Washington: American Geophysical Union, 1994. P. 337–361.

Wadhams P., Davis N.R. Further evidence of ice thinning in the Arctic Ocean // Geophysical Research Letters. 2000. Vol. 27. № 24. P. 3973–3975.

Walker E.R., Wadhams P. Thick sea ice floes // Arctic. 1979. Vol. 32. № 2. P. 140–147.

Winsor P. Arctic Sea Ice Thickness Remained Constant During the 1990s // Geophysical Research Letters. 2001. Vol. 28. № 6. P. 1039–1041.

V.YU.ALEXANDROV, O.M.JOHANNESSEN

CHANGES OF ICE THICKNESS IN THE ARCTIC SINCE THE END OF 19TH CENTURY

The paper deals with analysis of ice thickness changes in the Arctic in the period since the end of 19th Century and until present time. Comparison of ice thickness measurements made during «Fram» and «Sedov» drift shows that the approximately 25 % decrease of ice thickness in the area of the Laptev Sea and the nearby part of the Arctic Ocean from 1893 to 1937–1939 is due to significant decrease of freezing-degree days in winters of 1937–1939 as compared with 1893–1894 winter. A number of publications report significant decrease of ice thickness in the end of 20th – beginning of 21st Centuries, caused by multiyear ice area shrinking. The average thicknesses of multiyear and first-year ice also decreased, but less substantially. Record shows the largest rate of ice cover thinning in the period 2003–2008. While sea ice thickness in the Arctic is observed to be decreasing there are some regions, as for example that to the north of Greenland, where thickness was similar to that in the 1980s. In the period since 2007 until now no substantial changes of ice thickness were recorded. Analysis of changes in fast ice thickness in the areas of the Barents Sea, Eurasian Arctic Seas and in the Canadian Arctic reveal that the largest thinning of 0,11 m/decade was measured in the area of Hopen Island. A rate of decrease in fast ice thickness in the Eurasian Arctic Seas and in the Canadian Arctic was substantially less and in some stations ice thickness has increased.

Keywords: ice thickness, drifting ice, fast ice, Arctic.