УДК 551.326.1:551.583(98) Поступила 15 июля 2016 г.

ЛЕДОВИТОСТЬ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ В УСЛОВИЯХ КОЛЕБАНИЙ КЛИМАТА АРКТИКИ

канд. геогр. наук В.Е. БОРОДАЧЕВ[1], канд. хим. наук И.В. БОРОДАЧЕВ[2]

[1] — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: aaricoop@aari.ru

[2] — ООО «Кемтехнолоджи Рус», Санкт-Петербург, e-mail: igorboro@gmail.com

Проведен анализ долговременных колебаний ледовитости моря Лаптевых за период 1940–2014 гг. Выделен крупномасштабный цикл в изменении аномалий ледовитости с высокой продолжительностью ветви его роста и сокращенной его нисходящей ветвью в западной части моря. Показано, что средняя площадь сокращения льдов в море, сохранявшаяся с 1943 по 1995 г., свидетельствует о слабом влиянии глобального потепления на процесс очищения моря ото льдов. Однако последовавшее резкое сокращение площади ледяного покрова в течение 1995–2013 гг. может быть гипотетически отнесено к началу антропогенного воздействия на климат Арктики.

Ключевые слова: Северный Ледовитый океан, море Лаптевых, ледовитость, климат, потепление, цикличность, сокращение площади ледяного покрова.

РАЗЛИЧИЕ В ОРИЕНТАЦИИ ТРЕНДОВ АНОМАЛИЙ ЛЕДОВИТОСТИ В ДВУХ ЧАСТЯХ МОРЯ КАК ДОКАЗАТЕЛЬСТВО НЕСХОЖЕСТИ ИХ ЛЕДОВОГО РЕЖИМА

Потепление климата Земли в современную эпоху вызывает тревогу относительно его будущего развития и последующего влияния на жизнедеятельность человечества (Абдусаматов, 2009; Алексеев, 2003; Захаров, 2004; Дмитриев и др., 2011; Клименко, 2007; Кондратьев, 2004; Миронов, 2004; Митчелл, 1966; Фролов и др., 2007). Причиной этого большинство исследователей считают антропогенный фактор. Например, более 50 лет тому назад американский климатолог Мюррей Митчелл (1966) пришел к выводу о том, что антропогенный фактор уже начал сказываться на глобальном климате. С учетом мнения большинства ученых-климатологов в 1992 г. была принята Рамочная конвенция ООН — соглашение об общих принципах действия по проблеме изменения климата (Абдусаматов, 2009). В 1997 г. на ее основе был заключен Киотский протокол, связавший ряд государств международными ограничениями по снижению выброса в атмосферу парниковых газов.

Действительно в начале XXI в. потепление климата вызвало довольно значительное понижение площади дрейфующих льдов в Северном полушарии планеты. Между тем, в работе (Фролов и др. 2007) показано, что основными причинами изменения климата Арктики и состояния ее морского ледяного покрова являются естественные факторы, которые могут во много раз превышать антропогенное воздействие на климат. Но поскольку климат в XX в. изменялся неравномерно по сезонам и по

поверхности земного шара (Клименко, 2007), возникла необходимость исследовать долговременные колебания ледовитости в отдельных частях арктических морей, происходившие под действием вариаций климата Арктики.

В работе (Бородачев, 2014*б*) авторы настоящей статьи на основе выделения тренда понижения аномалий ледовитости использовали его линейное уравнение:

$$\Delta L(\tau) = \alpha_1 \tau + C, \qquad (1)$$

где ΔL — аномалия ледовитости (%), α_1 — эмпирический коэффициент, τ — год наблюдений, C – свободный член линейного уравнения (%).

Затем по данным работы (Дмитриев и др., 2011) ими был выделен тренд глобальной температуры воздуха в Арктике и рассчитано его уравнение:

$$\Delta T(\tau) = 0{,}01355\tau + C_2,$$

откуда следует, что

$$\tau = 73{,}8\Delta T - C_2, \qquad (2)$$

где ΔT — аномалия температуры (°С), C_2 — свободный член уравнения (°С).

После этого рассчитывалась формула связи аномалий ледовитости с температурой воздуха:

$$\Delta L = \alpha_1(73{,}8\Delta T - C_2) + C_1, \qquad (3)$$

где C_1 — свободный член линейного уравнения (%).

Уравнения (1) – (3) позволяли по данным трендов рассчитывать температуру воздуха Арктики, величину линейного понижения аномалий ледовитости и величину понижения аномалий, связанную с повышенной температурой воздуха, на любой год периода исследования. Однако следует обратить внимание на то, что связь между ΔL и ΔT, конечно, существует, но она многозначна и нелинейна. Но приняв ее линейной, авторы упомянутой выше работы достаточно убедительно доказали, что постоянное понижение ледовитости в Карском море было вызвано потеплением климата Арктики.

Однако не менее важным открытием было выделение крупномасштабного цикла в колебаниях ледовитости, продолжительностью около 60 лет, который определялся климатическим циклом, вызывавшим процессы похолодания и потепления Арктики.

Принятый метод исследования авторы настоящей статьи применили при изучении долговременных колебаний ледовитости в море Лаптевых. Как известно, большинство исследований ледяного покрова моря Лаптевых в основном носили режимный характер с разработкой методов ледовых прогнозов разной заблаговременности. Наибольший вклад в историю изучения гидрометеорологического и ледового режима этого моря внесли известные ученые: Д.Б. Карелин, И.Д. Карелин, Т.П. Морозова, А.Я. Николаева, Н.П. Шестериков и др. Особенно следует отметить работу (Кириллов, Спичкин, 1977), в которой был выделен в особый район — Северо-земельский, включавший две смежные части морей Карского и Лаптевых.

Что касается роли процессов потепления и похолодания воздуха в Арктике в изменении ледовых условий в арктических морях, то эта проблема стала разрабатываться с 1944 г. после открытия В.Ю. Визе (Визе, 1945) роли влияния атмосферных процессов и потепления климата 1920–1930-х гг. на ледяной покров. Значительно позже, только в 1976 г., В.Ф. Захаров (Захаров, 2004) осветил тему похолодания Арктики. В 2004 г. Е.У. Миронов (Миронов, 2004), исследуя изменения средней ледовитости за июнь–сентябрь, обнаружил параллельность ее развития с сопутствующими факто-

рами. Наконец, в 2007 г. под руководством И.Е. Фролова (Фролов и др., 2007) было проведено исследование климатических изменений ледовых условий арктических морей и установлено, что многолетние изменения температуры воздуха формировались линейными трендами и климатическими циклами продолжительностью до 60 лет. В колебаниях природных явлений и процессов были выделены три наиболее отличавшихся друг от друга периода — два (1933–1961 гг. и 1984–2005 гг.), характерных для «теплых» лет, и один (1962–1983 гг.) — для «холодных» лет. В результате исследования был разработан фоновый прогноз на XXI век.

Накопленный в XX–XXI вв. материал наблюдений над ледяным покровом арктических морей позволяет более детально изучить долговременные колебания ледовитости как в целом в морях, так и в каждой из их частей.

Среди арктических морей, окаймляющих северное побережье Российской Федерации, море Лаптевых занимает центральное положение, располагаясь между меридианами 100° в.д. – 140° в.д. Оно относится к шельфовым окраинным морям. С запада море ограничено островами арх. Северная Земля и Таймырским полуостровом, а с востока — арх. Новосибирские острова. В материковое побережье моря вдаются Хатангский, Анабарский, Оленекский и Янский заливы, названные по впадающим в них рекам, а также бухта Нордвик и губа Буор-Хая. Море широко открыто в сторону Арктического бассейна. С Карским морем оно сообщается через проливы Красной Армии, Шокальского, Б. Вилькицкого, а с Восточно-Сибирским — через проливы Дм. Лаптева, Этерикан и Санникова.

Основная часть моря Лаптевых мелководна с глубинами в среднем около 50 м. С севера до параллели 78° с.ш. распространяется глубоководная котловина — желоб Садко. С ее учетом средняя глубина моря составляет 533 м. Рельеф дна представлен батиальной равниной. Совокупность географических, метеорологических и гидрологических факторов, характеризующих своеобразный облик моря Лаптевых, формирует на его площади ледяной покров с большими толщинами и сложным рельефом, что определяет разнообразие в долговременных колебаниях его параметров.

На рис. 1, в качестве иллюстрации, представлен график колебаний аномалий ледовитости западной части моря Лаптевых, из которого видно, что линейный тренд аномалий ледовитости имеет положительный знак.

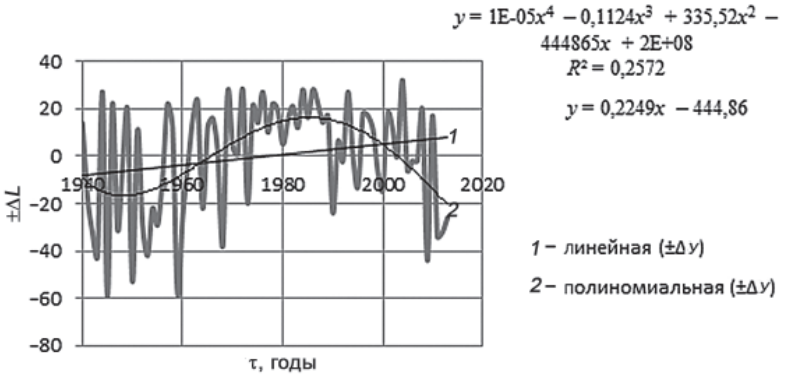

Рис.1. Долговременные колебания аномалий ледовитости в западной части моря Лаптевых в третьей декаде августа.

Расчеты показали, что тренды, отражающие направление в изменении всех декадных аномалий ледовитости в западной части моря Лаптевых, за исключением конца сентября, имели положительный знак (табл. 1):

Таблица 1

Параметры трендов аномалий ледовитости моря Лаптевых

Месяц, декада	Линейные уравнения трендов	ΔL_n	ΔL_k	V	Угол наклона тренда
Западная часть моря Лаптевых					
VII_1	$\Delta L = 0{,}060\tau - 119{,}1$	–2,7	1,7	0,059	3° 24′
VII_2	$\Delta L = 0{,}167\tau - 331{,}6$	–7,6	4,6	0,165	9° 23′
VIII_3	$\Delta L = 0{,}224\tau - 444{,}8$	–10,6	6,1	0,226	12° 43′
IX_3	$\Delta L = -195\tau + 385{,}8$	7,5	–7,5	0,203	11° 30′
Восточная часть моря Лаптевых					
VII_1	$\Delta L = -0{,}071\tau + 140{,}8$	2,8	–2,1	0,069	93° 57′
VIII_2	$\Delta L = -0{,}353\tau + 698{,}8$	12,9	–11,8	0,348	109° 10′

Примечание. ΔL_n и ΔL_k — аномалии ледовитости в начальный (1940 г.) и конечный (2014 г.) год наблюдения; V — скорость изменения аномалий ледовитости, %/год.

Это абсолютно неожиданный результат, утверждающий увеличение аномалий ледовитости в эпоху глобального потепления Арктики. До 1949 г. отрицательные аномалии ледовитости по версии полиномиального тренда увеличивались, что свидетельствовало о сохранении в предыдущие годы преобладания положительных температур воздуха. В последующем стали расти абсолютные значения аномалий, переходя с 1966 г. из области их отрицательных величин в область положительных. По данным линейного тренда рост абсолютных значений аномалий ледовитости обоих знаков продолжался до конца августа, достигнув максимальных значений в третьей декаде сентября (табл. 1). Это, конечно, повлияло на ориентацию трендов аномалий ледовитости в западной части моря, что отражено на (рис. 1). Но нам представляется, что такая устойчивость в сохранении положительных знаков в трендах аномалий ледовитости в западной части моря Лаптевых вызвана причинами более постоянными, нежели изменчивыми. Причем их действие должно быть направлено на длительное и постепенное замедление процесса очищения этой части моря, несмотря на глобальное потепление Арктики.

С этой точки зрения наиболее приемлемой причиной положительной ориентации трендов аномалий является система холодных течений, существующая в западной части моря. Смещая большие водные массы вдоль Евразийского материка, Трансарктическое течение своей южной периферией встречается с далеко выдвинутым в океан островом Комсомолец. Здесь часть этого водного потока раздваивается, образуя Североземельское холодное течение, которое, следуя вдоль архипелага Северная Земля, встречается с островами Старокадомского и Малый Таймыр и также раздваивается. Одна его часть поворачивает к востоку, формируя циклонический кругооборот вод и льдов на севере моря Лаптевых, а другая часть, обходя острова, соединяется с течением из пролива Б. Вилькицкого, образуя Таймырское холодное течение. Именно эта система холодных течений противодействует процессу сезонного очищения моря, что отражается на возникновении положительных знаков ежедекадных трендов.

Нельзя исключить процесс роста аномалий ледовитости в течение лета (до конца августа) при сокращении средних декадных значений ледовитости, происходящий

Таблица 2

Рост аномалий ледовитости в западной части моря Лаптевых летом, %

Месяц, декада	Средняя многолетняя ледовитость, %	Рост аномалий с 1940 по 2013 г.	
		1940 г.	2013 г.
VII_1	87	–3,1	+1,95
VII_3	83	–9,1	+5,5
VIII_3	67	–15,8	+9,1
IX_3	47	+16,0	–16,0

согласно закономерности, отмеченной авторами в работе (Бородачев, 2014*б*). Это подтверждается данными аномалий ледовитости по западу моря, рассчитанными по уравнениям трендов относительно среднедекадных значений ледовитости (табл. 2).

Наконец, положительный тренд аномалий ледовитости западной части моря Лаптевых соответствует восходящей ветви крупномасштабного цикла (см. рис. 4). Итак, исследование долговременных колебаний аномалий ледовитости в морях Баренцевом, Карском и Лаптевых дало неожиданные результаты. Во-первых, как и следовало ожидать, тренды аномалий ледовитости во всех частях Баренцева моря (Бородачев, 2014*а*), в юго-западной (Бородачев, 1998) и северо-восточной части Карского моря до третьей декады июля и восточной части моря Лаптевых были отрицательными. Это прямо указывало на непрерывное понижение ледовитости в этих частях морей в соответствии с потеплением климата Арктики. Во-вторых, впервые выявилась достаточно обширная область Арктики, включающая северо-восточную часть Карского моря и западную часть моря Лаптевых, где тренды аномалий ледовитости в течение длительного времени сохраняли положительные значения (табл. 3).

Таблица 3

Схема ориентации трендов аномалий ледовитости в морях Баренцевом, Карском и Лаптевых

Месяц	Ориентация трендов ледовитости						
	Баренцево море			Карское море		Море Лаптевых	
	В	СВ	ЮЗ	ЮЗ	СВ	З	В
IX	↘	↘	↘	↘	↗	↗	↘
VIII	↘	↘	↘	↘	↗	↗	↘
VII	↘	↘	↘	↘	↘	↗	↘
VI	↘	↘	↘	↘	↘	↗	–
V	↘	↘	↘	–	–	–	–

Примечание. В, СВ, ЮЗ, З, В — части морей; ↘ — понижение ΔL; ↗ — рост ΔL.

Из этого обстоятельства вытекает весьма важный вывод. Выявленная закономерность означает, что в Северном Ледовитом океане может сформироваться такой комплекс метеорологических, океанологических, орографических и других процессов регионального характера, который может затушевать, снизить или усилить (как это и было в 2007 г.) ведущую роль глобального потепления Арктики в сокращении площади льдов, что вытекает из фактических данных. Конечно, это предположение в настоящее время противоречит исследованиям, обосновавшим, что в современную эпоху потепление климата Земли вызывается астрономическими причинами. В част-

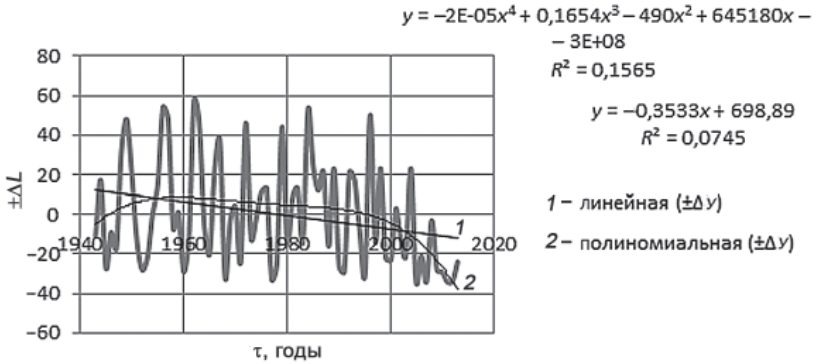

Рис. 2. Долговременные колебания аномалий ледовитости в восточной части моря Лаптевых во второй декаде августа.

ности, Х.И. Абдусаматов (2009) считает, что непосредственное влияние на изменение климата Земли оказывают двухвековые изменения в колебании солнечной постоянной.

Таким образом, возник некоторый парадокс относительно природы формирования области ледяного покрова в небольшой части Арктического бассейна, в которой возникли явления, противоречащие общепринятой идее о понижении ледовитости в арктических морях. В восточной части моря, в отличие от западной, знаки трендов аномалий ледовитости в течение лета оказались отрицательными (табл. 2), что свидетельствовало о непрерывном уменьшении ледовитости. Различие в знаках аномалий еще раз подтвердило давно известное разделение моря Лаптевых по природным условиям на две части (Переведенцев, 2004). В уменьшении ледовитости в восточной части моря Лаптевых несомненно внесло свое влияние потепление Арктики, что можно оценить в первом приближении по связи ΔL с ΔT. Однако представляется, что главную роль в уменьшении ледовитости здесь играет сезонное ее сокращение, которому способствует Новосибирское течение. Об этом свидетельствуют прежде всего чередование крупных (> 26 %) положительных и отрицательных аномалий ледовитости (рис. 2).

Высокое значение дисперсии ($\sigma = 26{,}5$ %) указывает на то, что во второй декаде августа в восточной части моря в период с 1940 по 2013 г. наблюдался паритет между сложной ледовой обстановкой и легкой. Действительно, с 1943 по 2013 г. отмечалось 8 крупных положительных аномалий ледовитости со средним значением +49 % и 13 отрицательных аномалий, среднее значение которых составляло –31 %. Но при этом частота проявления в годах между крупными аномалиями оказалась близкой: между положительными 8, а между отрицательными 7. Такая частота наступления крупных аномалий ледовитости обоих знаков в восточной части моря Лаптевых не может быть объяснена влиянием только процесса потепления климата Арктики. Свободный водо- и льдообмен этой части с Арктическим бассейном и Восточно-Сибирским морем приводит к сильному ухудшению ледовых условий при северных воздушных переносах, с понижением температуры воздуха и дрейфом льдов на юг. Наоборот, преобладание южных переносов воздуха усиливает вынос льдов, повышает температуру воздуха и резко улучшает ледовую обстановку.

Таким образом, авторами доказано, что глобальное потепление Арктики не оказало в явном виде сколько-нибудь значимого влияния на долговременные колебания ледовитости в западной части моря Лаптевых, за исключением периода с начала XXI столетия, но способствовало уменьшению ледовитости в его восточной части.

ФОРМИРОВАНИЕ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ЦИКЛОВ В КОЛЕБАНИЯХ АНОМАЛИЙ ЛЕДОВИТОСТИ В МОРЕ ЛАПТЕВЫХ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА АРКТИКИ

В XX — начале XXI в. в широтной зоне Арктики (70–85º с.ш.) господствовал крупный климатический цикл продолжительностью 60 лет (1906–1966 гг.), продолжением которого была восходящая ветвь следующего климатического цикла, сохраняющаяся до настоящего времени (Дмитриев и др., 2011; Фролов и др., 2007). Однако в некоторых исследованиях под циклом понимались периоды с преобладанием положительных аномалий (потепление) или отрицательных (похолодание). Но в периодах, в отличие от циклов, их ветви не выделяются, поэтому в работе (Фролов и др., 2007) были выделены три периода, а не цикла, названные периодами с «теплыми» годами (1933–1961 гг. и 1984–2005 гг.) и «холодными» годами (1962–1983 гг.).

В нашем исследовании принято, что любой цикл состоит из ветвей роста и спада явления или процесса, причем каждая из ветвей в развитии цикла, например изменения аномалий ледовитости, имеет две стадии: одну в области отрицательных аномалий, другую — в области ее положительных значений. Именно этим он отличается от периодов и иных циклов, например, от циклов солнечной активности. При этом понимается, что каждая ветвь цикла представляется линейным трендом изменения аномалий, имеющим собственное уравнение.

Анализ долговременных колебаний аномалий ледовитости (ΔL) в исследуемом ряду данных (1940–2013 гг.) позволил выделить крупномасштабные циклы по каждой декаде лета обеих частей моря Лаптевых и рассчитать линейные уравнения их ветвей (табл. 4). Итак, нисходящая ветвь 60-летнего цикла характеризовала глубокое

Таблица 4

Параметры крупномасштабных циклов аномалий ледовитости моря Лаптевых

Декада	Период	Линейные уравнения трендов	R^2	ΔL_n	ΔL_k	V	Угол наклона тренда
Западная часть моря Лаптевых							
VII	1945–1990	$\Delta L = 0{,}548\tau - 1079$	0,207	–13,1	24,1	0,809	38° 57′
	1990–2013	$\Delta L = -0{,}890\tau + 1783$	0,32	11,9	–8,6	0,854	139° 30′
VIII	1940–1986	$\Delta L = 0{,}944\tau - 1854$	0,249	–22,6	20,8	0,884	41° 28′
	1986–2013	$\Delta L = -1{,}162\tau + 2325$	0,221	17,3	–14,1	1,121	131° 44′
IX	1940–1986	$\Delta L = 0{,}313\tau - 612{,}1$	0,026	–4,9	9,5	0,306	17° 00′
	1986–2013	$\Delta L = -2{,}188\tau + 4370$	0,365	24,6	–34,4	2,108	154° 25′
Восточная часть моря Лаптевых							
VII	1943–1963	$\Delta L = 0{,}903\tau - 1757$	0,034	–2,7	14,6	0,855	40° 33′
	1963–1976	$\Delta L = -2{,}351\tau + 4637$	0,153	24,3	–8,6	2,19	114° 35′
	1976–1984	$\Delta L = 2{,}787\tau - 5513$	0,019	–5,9	16,4	2,48	60° 02′
	1984–2013	$\Delta L = -1{,}399\tau + 2789$	0,238	13,4	–27,2	1,35	126° 33′
VIII	1943–1963	$\Delta L = 0{,}323\tau - 630{,}0$	–	–2,4	4	0,582	30° 13′
	1963–1977	$\Delta L = -1{,}403\tau + 2765$	0,276	10,9	–8,7	1,307	127° 24′
	1977–1998	$\Delta L = 0{,}521\tau - 1034$	0,09	–4	7	0,917	42° 30′
	1998–2013	$\Delta L = -1{,}485\tau + 2975$	0,246	8	–14,3	1,394	125° 37′

Примечание. R^2 — квадрат коэффициента корреляции; ΔL_n и ΔL_k — аномалии ледовитости в начальный (1940 г.) и конечный (2013 г.) годы исследуемого периода; V — скорость изменения аномалий ледовитости, ΔL/год.

похолодание в Арктике, а восходящая ветвь последовавшего за ним современного цикла — устойчивое потепление климата Северного полушария. Наиболее ярко этот цикл проявился в Карском морем, продолжительность нисходящей ветви которого, равная 28 годам, была короче восходящей. Этот климатический цикл сформировал крупномасштабный цикл в изменении ледовитости западной части моря Лаптевых.

Первой характерной особенностью такого цикла в западной части моря Лаптевых является высокая продолжительность ветви «роста» ледовитости, то есть времени замедленного разрушения льдов и очищения моря. В конце июля (с этого месяца в море Лаптевых начали производить ледовые авиационные наблюдения) она в два раза превосходила продолжительность развития ветви понижения аномалий ледовитости (рис. 3, 4). Это свидетельствует о том, что в этой части моря Лаптевых, в отличие от северо-востока Карского, период похолодания климата был существенно длиннее, чем период его потепления. Надежность полученного результата расчета подтверждается расположением линии полиномиального тренда на исследуемом отрезке времени.

Вторая особенность восходящей ветви цикла в третьей декаде июля — восемь крупных отрицательных аномалий ледовитости, которые отмечались с 1945 по 1973 г.

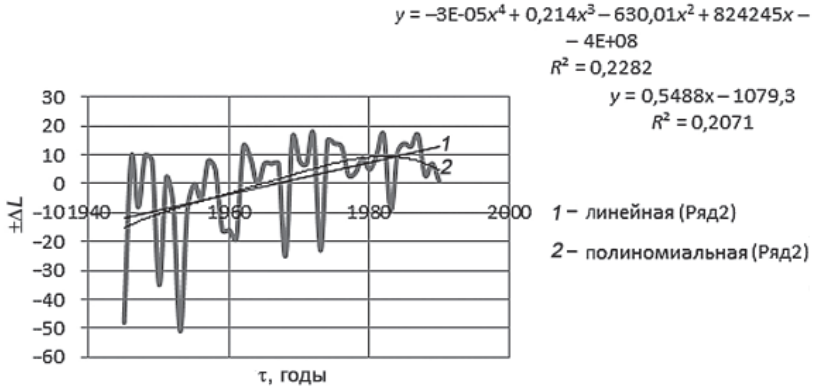

Рис. 3. Положение ветви «роста» крупномасштабного цикла изменения аномалий ледовитости в западной части моря Лаптевых в третью декаду июля.

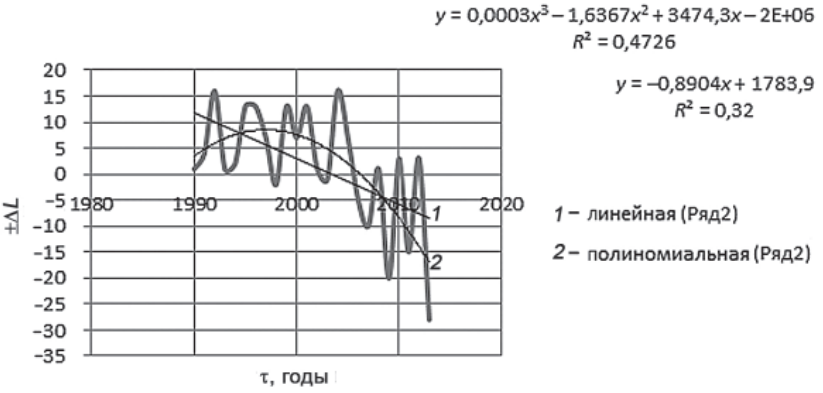

Рис. 4. Нисходящая ветвь крупномасштабного цикла изменения аномалий ледовитости в море Лаптевых в третью декаду июля.

со средней аномалией 29 %. Характерно, что размах межгодовых колебаний аномалий ледовитости существенным образом сужался с 1940 к 1990 г.

Крупных положительных аномалий в пределах восходящей ветви цикла практически не отмечалось, хотя общее количество положительных аномалий составляло 30 единиц, что превышало количество отрицательных аномалий более чем в два раза. Нисходящая ветвь цикла отражала резкое снижение ледовитости в период с 1985 по 2013 г. под действием, прежде всего, потепления климата Арктики (рис. 4). Тем не менее даже при этих условиях тренды долговременных колебаний аномалий оставались положительными.

В эти годы повысился не только коэффициент корреляции между фактическими и рассчитанными нами по линейным уравнениям аномалиями ледовитости, но выросла и скорость уменьшения ледовитости, составив 0,854 %/год. Из сопоставления (рис. 3 и 4) видно, что значение высоты цикла изменения аномалий ледовитости, рассчитанное по разным уравнениям трендов, оказалось почти равным (11 и 12 %), причем максимум высоты цикла наступил точно в 1990 г. Все полученные данные подтверждают правильность принятой в исследовании гипотезы.

В восточной части моря Лаптевых наблюдалось весьма неожиданное явление: климатический цикл породил два крупных цикла в изменении аномалий ледовитости вместо одного (рис. 5). Это показало отличие в процессе долговременных колебаний ледовитости в восточной части от западной и изменение ритмичности этих колебаний. Поскольку авиационные ледовые наблюдения в этой части моря начались только с 1943 г., первый цикл аномалий (назовем его B_1) включает 1943–1975 гг. с максимумом в 1963 г. Тренды и линейные уравнения восходящей и нисходящей ветвей цикла представлены в табл. 4. Самое примечательное, что и в этой части моря, откуда происходит постоянный вынос льдов на север, тем не менее повторяется сокращенный по продолжительности период похолодания Арктики.

Анализ показал, что ориентация тренда восходящей ветви цикла (B_1) изменения аномалий ледовитости достаточно хорошо совпадает с понижением индекса САК (Северо-Атлантического колебания) (Захаров, 2004, с.78, рис. 3.7). Индекс САК вычисляется как разность давления в районах между Азорскими островами и Исландией и характеризует динамику переноса воздушных масс с запада на восток в североатлантическом регионе (Дмитриев и др., 2011).

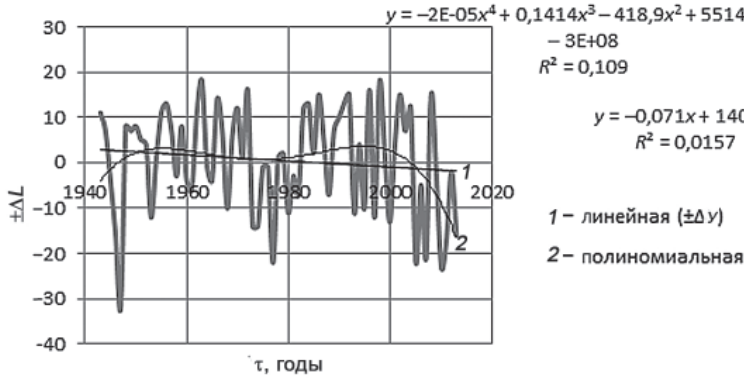

Рис. 5. Два крупномасштабных цикла изменения аномалий ледовитости в восточной части моря Лаптевых.

В упомянутой работе отмечено, что в годы понижения индекса САК исландский минимум был ослаблен, а в высоких широтах Арктики наблюдалось похолодание. Заметим, что выделение центров действия атмосферы (ЦДА) и САК с последующими расчетами их индексов, а также продолжительности развития трендов при изменении ледовитости не являются простыми исследовательскими приемами. Поэтому периоды их действия совпадают не всегда точно. Однако резкое повышение индекса САК с 1964 по 1977 г. почти полностью совпало с периодом роста восходящей ветви цикла B_1.

Можно предположить, что долговременные колебания аномалий ледовитости в период развития цикла B_1 в восточной части моря Лаптевых объясняются индексом североатлантических колебаний, которые то усиливают западно-восточный перенос, то активизируют антициклоническую циркуляцию в Атлантике, приводящую к разрастанию арктического антициклона и похолоданию климата Арктики.

Этот вывод подтверждается также развитием цикла B_2, отражавшего долговременные колебания аномалий ледовитости в восточной части моря продолжительностью 33 года (1977–2010 гг.). Характерно, что в колебаниях индекса САК отмечалось два коротких цикла: 1969–1978 гг. и 1979–1986 гг., которые в принципе совпадали с продолжительностью развития обеих ветвей цикла B_2. Поскольку развитие этих двух циклов проходило на повышенном относительно нормы фоне индекса САК, их действия не повлияли на сохранность отрицательного знака единого тренда аномалий ледовитости во всей восточной части моря Лаптевых (рис. 5).

Таким образом, исследования долговременных колебаний ледовитости, проводимые отдельно по каждой части морей Баренцева, Карского и Лаптевых, убеждают, что в XX — начале XXI в. Арктика находилась в эпохе глобального потепления климата. Однако на тренд его потепления периодически накладывались климатические циклы продолжительностью от 90 до 11 лет (Абдусаматов, 2009; Дмитриев и др., 2011), которые вносили крупные «аномалии» в климат Арктики. Такой аномалией было усиление потепления Арктики в 20–30-х годах XX столетия, которое первым открыл всемирно известный советский ученый В.Ю. Визе.

Но наиболее крупной аномалией климата Арктики явилось похолодание с 1940 по 1966 г., что, по нашему мнению, представляло нисходящую ветвь крупномасштабного климатического цикла, продолжительность которого составляла 60 лет, что совпадает с результатами, полученными ранее (Фролов и др., 2007). Это подтверждается годовыми аномалиями температуры воздуха, приведенными в работе (Дмитриев и др., 2011): в 1939 г. она была +1,3 °С, а в 1966 г. температура воздуха составляла уже –1,3 °С.

Можно сделать вывод о том, что такие явления в изменении климата Арктики, по всей вероятности, представляют результат взаимодействия двух центров действия атмосферы Северной Атлантики — Исландского минимума и Азорского максимума (Дмитриев и др., 2011). Динамика этих центров достаточно надежно отражается индексом САК. Поэтому крупномасштабные циклы долговременных колебаний аномалий ледовитости или изменяются параллельно изменению в смещении индекса САК, или они во многом зависят от характера взаимодействия отмеченных центров действия атмосферы.

ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ ПЛОЩАДЕЙ ЛЕТНЕГО СОКРАЩЕНИЯ ЛЬДОВ В МОРЕ ЛАПТЕВЫХ

В научной литературе по морским льдам непременно исследуются колебания площади льдов (Захаров, 2004; Миронов, 2004; Фролов и др., 2007). При этом ее расчеты преимущественно производятся по данным за август. Вместе с тем довольно часто практике

и науке требуются сведения о площадях сокращения льдов (ПСЛ) или, что то же самое, о площадях очищения арктических морей ото льдов (ПОМ), достигнутых к концу лета. В принципе, применение в статье единого термина не имеет большого значения, тем более что на графиках долговременных колебаний аномалий можно отмечать области чистой воды и остаточных льдов. Разница состоит в том, что рассчитанные нами площади сокращения льдов не ограничены какой-либо декадой августа или средней за август, а ограничены периодами полного очищения или сроками наступления нового ледообразования.

В колебаниях ПСЛ в западной части моря Лаптевых прежде всего обращают на себя внимание их достаточно низкие значения. Средняя площадь сокращавшихся ежегодно льдов в западной части моря составляет 141 тыс. км^2 . На 74-летнем периоде колебаний ПСЛ на западе моря Лаптевых площадь акватории без льдов до начала ледообразования оказалась только в двух годах (1959 и 2011 гг.). Еще у четырех лет (1945, 1973, 1995 и 2000 гг.) площадь чистой воды в конце лета не превышала 240 тыс. км^2. Наиболее ожидаемым результатом в изменении ПСЛ в этой части моря явилось появление положительного знака ее тренда (рис. 6).

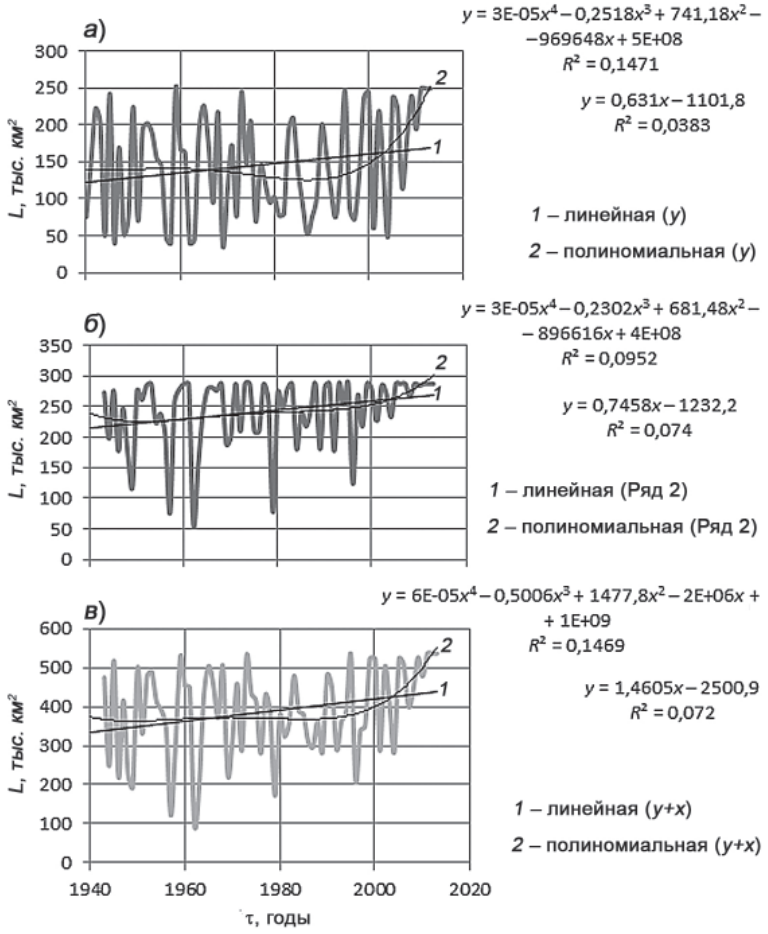

Рис. 6. Колебания площади сокращения льдов: *а* — в западной части моря Лаптевых; *б* — в восточной части моря Лаптевых; *в* — в море Лаптевых в летний сезон.

Таким образом, в западной части моря Лаптевых площадь сокращения льдов, несмотря на положительные знаки трендов сезонных аномалий ледовитости, увеличивалась со средней скоростью 1,94 тыс. км^2/год. Следовательно, длительный процесс потепления климата Арктики благотворно отразился на очищении западной части моря. Анализ колебаний ледовитости на западе моря показал, что в их развитии можно выделить три периода. Первый период с 1941 по 1966 г. представлял семейство крупных годовых размахов ледовитости со среднегодовой ПСЛ, равной 146 тыс. км^2. В течение второго периода (1966–1989 гг.) происходило снижение ПСЛ на 45 тыс. км^2, что отражено уравнением:

$$L(\tau) = -1{,}964\,\tau + 4010, \qquad (4)$$

где L — ледовитость, тыс. км^2, τ — искомый год.

Наконец, в третий период (1989–2011 гг.) площадь льдов сокращалась, а ПСЛ возрастала (5):

$$L(\tau) = 3{,}551\tau - 6941. \qquad (5)$$

Создается впечатление, что в западной части моря Лаптевых период в развитии ледовитости с 1966 до 2011 г., представлявший крупномасштабный цикл, повторил, хотя и в очень слабой степени, аналогичный цикл Карского моря. Именно поэтому на его возрастающей ветви в период с 1989 до 2011 г. площадь льдов увеличилась за лето, а площадь сокращения их увеличилась на 96 тыс. км^2, или на 38,5 % от площади западной части моря. Оба эти периода весьма хорошо отражены полиномиальным трендом.

Колебания ПСЛ в восточной части моря отличались от западной прежде всего тем, что большая часть ее значений (44 %) была выше нормы. Однако более существенное различие состояло в увеличенном количестве лет с полным очищением восточной части моря —16 лет (22,5 %) из 71-летнего ряда. В этой части моря четко обозначилось общее повышение ПСЛ, причем линейный и полиномиальный тренды практически совпадали на протяжении периода с 1954 до 2003 г.

Убедительно выделились годы с крупными аномалиями ПСЛ (1946, 1949, 1957, 1962, 1977 и 1996 гг.). Если площади обеих частей моря Лаптевых разнились всего на 38 тыс. км^2, то уже средние значения их ПСЛ увеличились до 106 тыс. км^2, что указывает на существенное различие в режиме очищения ото льдов этих частей моря.

Особенно разительно отличие роли колебаний ПСЛ обеих частей моря в колебаниях общей площади сократившихся льдов по морю Лаптевых в целом. Несмотря на повышенную площадь восточной части моря по сравнению с западной, общий характер колебаний ПСЛ моря в целом и их ритмика почти однотипны с такими же колебаниями на его западе (рис. 6 *а, в, с*). Это очень важный вывод, объясняющий, что в вариациях ледового режима моря главная роль принадлежит колебаниям площади льдов на западе моря, то есть изменчивости площади в большей мере Таймырского ледяного массива и в меньшей Янского. Этот вывод в основном подтверждает известные закономерности ледового режима моря, но его новизна заключается в отражении конкретных вариаций площади льдов в каждой его части на протяжении 1940–2014 гг. и их вкладе в долговременные колебания площади льдов в море Лаптевых в целом.

Необходимо привести некоторые статистические показатели в колебаниях ПСЛ моря Лаптевых. Средняя многолетняя площадь ежегодного сокращения льдов в море составляет 388 тыс. км^2, что соответствует 72,4 % от площади моря. Однако размах ее достигает существенных значений: в 1962 г. площадь открытой воды в

море составляла всего 97 тыс. км^2 (18,09 %), а в каждом из годов с 2011 по 2013-й она составляла уже 439 тыс. км^2, или 81,9 %. Это, естественно, определило величину дисперсии: 105,5 тыс. км^2 (±52,25 тыс. км^2), при этом СКО = 8,852.

ВЫВОДЫ

Выполненное исследование долговременных колебаний ледовитости показало, что в арктических морях чередуются области с отрицательными трендами ледовитости, в которых происходит ее длительное понижение, и области с положительными трендами, в которых происходит существенное замедление процесса таяния льдов и сокращения их площадей. Характерно, что положительные тренды изменения аномалий ледовитости присущи морям с большими площадями припайных льдов, средние сроки взлома которых как раз относятся к третьей декаде июля. Закономерным выглядит уменьшение продолжительности, сроков начала и окончания крупномасштабных циклов ледовитости и их высот. Наиболее рельефно такой цикл представлен в Карском море, уже в восточной части моря Лаптевых он разделяется на два цикла и относительно слабо выражен в Восточно-Сибирском море.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абдусаматов Х.И. Солнце диктует климат Земли. СПб.: Изд-во «Логос», 2009. 197 с.

Алексеев Г.В. Исследования изменений климата Арктики в XX столетии // Тр. ААНИИ. 2003. Т. 446. С. 6–21.

Белязо В.А. Планетарные циклы в колебаниях атмосферной циркуляции и их проявление в некоторых процессах Арктики // Тр. ААНИИ. 1999. Т. 441. С. 46–51.

Бородачев В.Е. О периодическом характере изменения площади льдов некоторых возрастных видов // Тр. ААНИИ. 1985. Т. 396. С. 68–75.

Бородачев В.Е. Льды Карского моря. СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. 182 с.

Бородачев В.Е., Бородачев И.В. К вопросу о климатических периодах и циклах ледовитости Баренцева моря // Экспресс-информация. 2014*а*. Вып. 40. 56 с.

Бородачев В.Е., Бородачев И.В. Ледовитость Карского моря в вариациях климата Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2014*б*. № 2 (104). С. 57–67.

Бородачев В.Е.,Тимохов Л.А. О строении ледяного покрова // Труды ААНИИ. 1979. Т. 364. С. 52–63.

Визе В.Ю. Основы долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей // Тр. ААНИИ. 1944. Т. 190. 273 с.

Волков Н.А., Слепцов-Шевлевич Б.А. О цикличности в колебаниях ледовитости арктических морей // Тр. ААНИИ. 1971. Т. 303. С. 5–305.

Гудкович З.М.,Кириллов А.А.,Ковалев Е.Г.,Сметанникова А.В.,Спичкин В.А. Основы долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 328 с.

Дмитриев А.А., Белязо В.А., Гудошников Ю.П. Ритмические колебания земных природных процессов и их гравитационная обусловленность. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2011. 231 с.

Захаров В.Ф. Похолодание Арктики и ледяной покров арктических морей. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 95 с.

Зубакин Г.К., Бузин И.В. Характеристика многолетних изменений параметров климатической системы Баренцевоморского региона и возможный механизм ее развития // Тр. ААНИИ. 2009. Т. 450. С. 67–80.

Имбри Дж., Имбри К.П. Тайны ледниковых эпох. М.: Прогресс, 1988. 263 с.

Карелин Д.Б. Влияние гидрометеорологических условий на состояние льдов в море Лаптевых // Тр. ААНИИ. 1945. Т. 188. 259 с.

Кириллов А.А., Спичкин В.А. Методика прогноза распределения льдов в юго-западной части Карского моря // Тр. ААНИИ. 1973. Т. 307. С. 79–82.

Клименко В.В. Климатическая сенсация.Что нас ожидает в ближайшем и отдаленном будущем. URL: www.polit ru/lectures/2007/02/15/ Климанко.html [дата обращения 15.07.2015]

Кондратьев К.Я. Изменение глобального климата: нерешенные проблемы // Метеорология и климатология. 2004. № 6. С.118–127.

Миронов Е.У. Ледовые условия в Гренландском и Баренцевом морях и их долгосрочный прогноз. СПб.: ААНИИ, 2004. 314 с.

Митчелл Дж.М. Современные вековые колебания температуры земного шара // Солнечная активность в изменении климата. Л.: Гидрометеоиздат, 1966. С. 86–105.

Николаева А.Я., Шестериков Н.П. Метод расчета ледовых условий (на примере моря Лаптевых) // Тр. ААНИИ. 1979. Т. 292. С. 143–217.

Оль А.И. Проявление 22-летнего цикла солнечной активности в климате Земли // Тр. ААНИИ. 1969. Т. 289. С. 116–131.

Переведенцев Ю.П. Теория климата. Казань: Изд-во Казанского университета, 2004. 318 с.

Смирнов Н.П., Саруханян Э.И., Розанова И.В. Циклические центры действия атмосферы Южного полушария и изменение климата. СПб.: РГГМУ, 2002. 121 с.

Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М. Климатические изменения ледовых условий в арктических морях Евразийского шельфа // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. Вып. 75. С. 149–160.

V.E. BORODACHEV, I.V. BORODACHEV

LAPTEV SEA ICE EXTENT IN ARCTIC CLIMATE FLUCTUATION CONDITIONS

The analysis on long-term fluctuations of the Laptev Sea ice coverage over a period of 1940–2014 has been performed. Large-scale cycle in ice extent anomalies change with high duration of growth phase and abbreviated phase of its reduction in Western part of the sea was emphasized. It is shown that variation of ice area reduction lasted from 1943 till 1995 indicates the slight impact of global warming on ice clearing process. But the following sharp reduction of ice area from 1995 till 2013 can be hypothetically referred to the beginning of man-caused impact on Arctic climate.

Keywords: Arctic Ocean, Laptev Sea, ice extent, climate, warming, cyclicity, ice cover reduction.