

ЛЕДОВИТОСТЬ КАРСКОГО МОРЯ В ВАРИАЦИЯХ КЛИМАТА АРКТИКИ

канд. геогр. наук В.Е. БОРОДАЧЕВ, канд. хим. наук И.В. БОРОДАЧЕВ

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

В статье выполнен анализ долговременных колебаний ледовитости Карского моря, связанных с вариациями климата Арктики. Показано, что ее «вековое» понижение определяется глобальным потеплением климата, величина тренда которого составляет +0,01355 град/год. Открыто парадоксальное явление — закономерное понижение ледовитости в северо-восточной части моря до второй декады июля затем резко сменяется на ее повышение при сохранении глобального потепления климата Арктики. В долговременных колебаниях ледовитости выделен крупномасштабный цикл, характерный для обеих частей Карского моря, формирование которого обусловлено циклическими изменениями климата Арктики. Показано, что процессы похолодания и потепления Арктики определили резко разграниченные периоды накопления и сокращения площади льдов в летний период в Карском море. Несомненно, что процессы взаимодействия ледяного покрова, охватывающего такую небольшую по площади акваторию, как Карское море, с климатом Арктики относятся к планетарным.

Ключевые слова: морской лед, ледовитость, климат, Карское море

«ВЕКОВОЕ» Понижение ледовитости Карского моря в условиях глобального потепления климата Арктики

Нет сомнения в том, что ледовитость арктических морей на протяжении ее длительной истории испытывала периоды своего сокращения и увеличения, связанные с подобными периодами похолодания и потепления климата Земли. Еще в 1944 г. В.Ю. Визе (Визе, 1944) обратил внимание на потепление Арктики в 1920–1930 гг., объяснив его результатом усиления общей циркуляции атмосферы. В 1976 г. В.Ф. Захаров (Захаров, 1976) показал, что за потеплением Арктики последовало ее похолодание, наступившее после 1940-х гг. Важный вывод в его исследовании состоял в утверждении о неравномерности распределения областей похолодания по территории Арктики. При этом автор выявил зависимость изменения отдельных элементов ледового режима от похолодания Арктики. В 2004 г. Е.У. Миронов (Миронов, 2004), на основе анализа 96-летнего ряда средней величины ледовитости Баренцева моря за апрель–август, выделил четыре периода в ее колебаниях продолжительностью от 12 до 39 лет, с рассчитанными для них линейными уравнениями трендов. Им было подчеркнуто, что периоды ледовитости изменялись синхронно с температурой воздуха в Баренцбурге, температурой воды на разрезе Кольского меридиана и числом дней с глубокими циклонами. В 2007 г. И.Е. Фролов с группой ученых (Фролов и др., 2007), на основе использования современных методов спектрального анализа, привели более объективные доказательства существования 10-, 20- и 50–60-летних

циклов в колебаниях площади льдов Арктики, показав при этом, что причинами изменения климата Земли являются естественные факторы. Авторы отметили влияние внешних и внутренних факторов на климатические изменения состояния ледяного покрова и предположили, что в формировании 10–20-летних циклов заметную роль играет солнечная активность. В долговременных колебаниях природных явлений и процессов ученые выделили два периода (1933–1961 и 1984–2005 гг.), характерных для «теплых» лет, и один период (1962–1983 гг.) был отнесен к «холодным» годам. О наличии различных периодов и циклов в многолетних колебаниях ледовитости и площадей ледяных массивов отмечали многие отечественные ученые (Алексеев, 2003; Беязо, 1999; Бородачев, 2014; Визе, 1944; Волков, Слепцов-Шевлевич, 1971; Захаров, 1976; Зубакин, Бузин, 2009; Карклин, 1973; Фролов и др., 2007). При этом везде под периодом понималось время преобладания знака аномалий ледовитости.

Развивая идеи дифференцирования ледовитости на составляющие природные периоды и циклы, авторы настоящей статьи выделили в долговременных ее колебаниях наиболее значимые циклы и показали природу их формирования, зависимую от вариаций климата Арктики. При этом если климат в данном случае представлен среднегодовой температурой Арктики (Беязо, 1999; Дмитриев и др., 2011; Карклин, Ковалев, 1994; Фролов и др., 2007), то ледовитость ограничивалась площадью льдов, распределенных на акватории Карского моря. Следовательно, рассмотренные ниже процессы носят макромасштабный характер. В долговременных колебаниях ледовитости Карского моря прежде всего обращает на себя внимание устойчивая тенденция к ее понижению, проявляющаяся в изменениях ее трендов с июня по сентябрь включительно на протяжении 1938–2011 гг., которые хорошо описываются линейными уравнениями. В табл. 1 приведены уравнения трендов аномалий ледовитости юго-западной части для каждой декады. До сих пор долговременные колебания ледовитости исследовались в основном по данным августа, что снижало их информативность, поскольку терялись региональные особенности ее сезонной изменчивости.

Первая особенность в «вековых» колебаниях ледовитости вытекает из того, что углы наклона линейных трендов относительно оси абсцисс в летний сезон сначала уменьшаются (с третьей декады июня по вторую декаду июля при одновременном снижении средних декадных значений аномалий ледовитости), а затем резко увеличиваются в третьей декаде июля с 2 до 16° (табл. 1). Аналогичная особенность в из-

Таблица 1

Уравнения линейных трендов аномалий ледовитости юго-западной части Карского моря

Месяц, декада	Уравнение	R^2	Наклон тренда	Год пересечения
VI ₃	$\Delta L = -0,172\tau + 340,8$	0,101	9° 53'	1981
VII ₁	$\Delta L = -0,055\tau + 109,5$	0,005	3° 11'	1991
VII ₂	$\Delta L = -0,033\tau + 65,4$	0,000	1° 58'	1981
VII ₃	$\Delta L = -0,317\tau + 626,0$	0,057	16° 00'	1976
VIII ₁	$\Delta L = -0,266\tau + 526,0$	0,048	15° 10'	1977
VIII ₂	$\Delta L = -0,230\tau + 453,8$	0,069	13° 10'	1973
VIII ₃	$\Delta L = -0,085\tau + 168,4$	0,014	5° 00'	1981
IX ₁	$\Delta L = -0,052\tau + 104,0$	0,011	3° 09'	2000

менении линий наклона относительно оси абсцисс присуща аномалиям ледовитости в северо-восточной части моря, где они увеличиваются с 0 до 7°. Эта особенность характерна для Карского моря, но она отсутствует в Баренцевом море (Бородачев, 2014), на режим которого отепляющее влияние оказывает Северная Атлантика и Северо-Атлантическое течение. Отсюда вытекает, что природные условия в обеих частях Карского моря в третью декаду июля отличались от других декад предшествующего периода. Действительно, например, в юго-западной части моря распределение ледовитости в эту декаду на исследуемом ряду лет характеризовалось наибольшей рассеянностью (Бородачев, 1998), при этом площадь редких и разреженных льдов достигала своих максимумов, как среднее линейное отклонение, так и дисперсия. В этой декаде впервые произошло полное очищение моря ото льдов, что случилось в 1945 г. В табл. 2 приведены данные о количестве лет и вероятности полного очищения юго-западной части Карского моря.

Таблица 2

Количество лет и вероятность полного очищения юго-западной части Карского моря

Декада	VII ₃	VIII ₁	VIII ₂	VIII ₃	IX ₁
$\sum n_i$	1	4	13,5	27	42
P_i	0,015	0,059	0,212	0,412	0,676

Приведенные данные отражают закономерное увеличение числа лет с полным очищением этой части моря ото льдов в течение летнего сезона. Более того, отмечаемый рост лет ($\sum n_i$) вполне может быть выражен периодическим законом изменения, который можно аппроксимировать синусоидой (1):

$$\sum n_i = k \sin(x + 270^\circ). \quad (1)$$

Именно для третьей декады июля характерно аномально высокое количество лет (20) с низкой ледовитостью (< 30 %). Это в четыре раза больше, чем во второй декаде, и, видимо, связано с сокращением в два раза количества лет с высокой ледовитостью (> 70 %) и ускоренным развитием процессов резкого ее расслоения в указанную декаду. Аналогичные процессы происходили в северо-восточной части моря, но с меньшей интенсивностью. Таким образом, обнаружено неизвестное ранее явление: естественный процесс летнего понижения ледовитости и сближения линий наклона ее трендов с линиями средней многолетней ледовитости (осью абсцисс) в Карском море в третьей декаде июля вдруг оказался нарушенным неожиданным сдвигом в сторону их резкого отстранения с увеличением угла наклона. Вместе с тем этот процесс не нарушил общую закономерность «векового» понижения ледовитости. Обратимся к графику (рис. 2) изменения аномалий среднегодовой температуры воздуха в Арктике с 1900 по 2010 г. (Дмитриев и др., 2011), на котором нанесены тренды периодов потепления и похолодания Арктики. Мы позволили себе воспользоваться упомянутым графиком, чтобы найти тренд повышения аномалий температуры воздуха за весь исторический период. Ниже приведено линейное уравнение глобального повышения аномалий температуры воздуха в Арктике

$$\Delta T_i = 0,01355 \tau - 26,49, \quad (2)$$

где ΔT_i (°C) — аномалия температуры воздуха в i -й год, τ — искомый год.

Расчет показал, что тренд глобального потепления воздуха в Арктике оказался равным 0,01355 град/год. В работе (Фролов и др., 2007) тренд потепления оказался равным 0,0097 град/год. Следовательно, за 110 лет климат Арктики потеплел на 1,5 °C.

Таким образом, связь аномалий ледовитости любой декады, рассчитанных по линейным уравнениям (табл. 1), с аномалиями температуры воздуха Арктики для любого искомого года определяется новым уравнением:

$$\Delta L_i = k\Delta T_i + C. \quad (3)$$

Для третьей декады июля, например, расчет проводится по уравнению:

$$\Delta L_{VII} = -23,4 \cdot \Delta T + 6.$$

Вторая из наиболее ярких особенностей в долгосрочных колебаниях аномалий ледовитости состоит в отклонении ориентации линий ее трендов в северо-восточной части моря от вышеописанных. Несмотря на глобальное потепление климата Земли в XX–XXI столетиях, линейные тренды аномалий ледовитости в северо-восточной части моря с третьей декады июля из отрицательных перешли к положительным. В качестве иллюстрации к изложенному ниже приведен рис. 1.

Это весьма неожиданное, скорее всего парадоксальное явление, обнаружение которого свидетельствует о резком замедлении процесса таяния льдов в августе–сентябре в 1960–1980-е гг. и сокращения их площади, с одной стороны, а с другой стороны, подтверждает выводы о сложности картины распространения климата по Арктике. Оно расходится также с общепризнанным фактом — существованием лишь отрицательной тенденции в изменении площади льдов в арктических морях в XX–XXI столетиях (Алексеев, 2003; Бородачев, 2014; Визе, 1944; Захаров, 1976; Миронов, 2004; Фролов и др., 2007). Здесь необходимо пояснение. Аномалия ледовитости для каждого года любой декады рассчитывается по конкретному линейному уравнению, которое отражает положение линии тренда относительно линии средней ледовитости или оси абсцисс. Угол взаимного положения этих линий в принципе зависит от соотношения величины аномалии начального (ΔL_N) и конечного (ΔL_K) года исследуемого периода. При $\Delta L_N > \Delta L_K$ линия будет иметь отрицательный знак — ледовитость уменьшается. При $\Delta L_N < \Delta L_K$ линия тренда станет положительной — ледовитость растет. Именно такая ситуация возникла в северо-восточной части Карского моря в августе и сентябре, что позволило сформулировать правило: знаки при коэффициенте и свободном члене линейного уравнения четко отражают тенденцию в изменении ледовитости. Отрицательный знак при коэффициенте и положительный знак при свободном члене уравнения показывают, что в этот период происходило понижение ледовитости. Наоборот, при положительном знаке коэффициента и отрицательном знаке свободного члена уравнения в долговременных колебаниях ледовитости в данный период будет

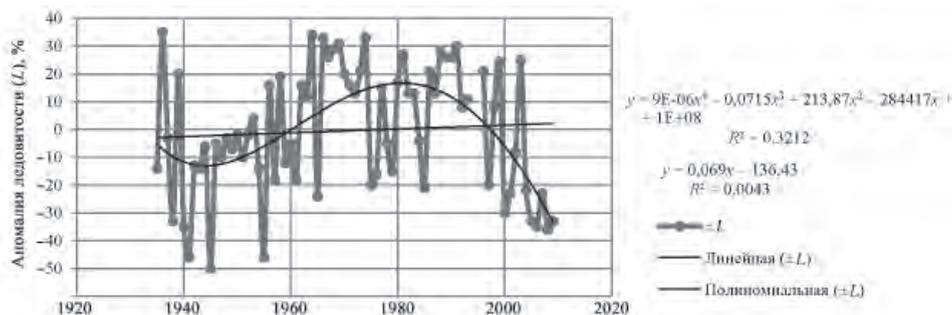


Рис. 1. Долговременные колебания ледовитости северо-восточной части Карского моря во второй декаде августа.

наблюдается рост ледовитости. В настоящее время уже никого не удивляет, что климат Земли непрерывно меняется. Многочисленными исследованиями доказано, что эти изменения имеют циклический характер, и, как показал Х.И. Абдусаматов (Абдусаматов, 2009), они протекают параллельно с изменением радиуса Солнца и вариациями солнечной постоянной. При этом существует корреляция между циклическими вариациями солнечной постоянной и такими же циклическими изменениями климата Земли. Выявленные закономерности относятся также к климату Арктики. А поскольку ледяной покров Северного Ледовитого океана является продуктом взаимодействия атмосферы и океана, значит, климатические изменения оказывают непосредственное влияние на долговременные колебания ледяного покрова. Полученное выражение (3) показывает, что «вековое» понижение ледовитости на столь малой акватории, как Карское море, определяется глобальным потеплением климата Земли. Поэтому можно предположить, что тренд понижения ледовитости скорее всего представляет результат воздействия восходящей ветви двухвекового климатического цикла (Абдусаматов, 2009).

МАКРОМАСШТАБНЫЙ ЦИКЛ В ДОЛГОСРОЧНЫХ КОЛЕБАНИЯХ ЛЕДОВИТОСТИ КАРСКОГО МОРЯ, СФОРМИРОВАННЫЙ ПРОЦЕССАМИ ПОХОЛОДАНИЯ И ПОТЕПЛЕНИЯ АРКТИКИ

Глобальное потепление климата Земли, как утверждает ряд ученых, вызвано небывало высоким уровнем потока солнечной энергии. Многие сходятся к мысли о влиянии на климат Земли непрерывно растущего содержания углекислого газа в атмосфере планеты, создающего парниковый эффект. В 2009 г. Х.И. Абдусаматов (Абдусаматов, 2009), не соглашаясь с этой точкой зрения, все же отметил, что существует четкая связь между концентрацией углекислого газа и глобальной температурой. Тем не менее автор утверждал, что ледяной покров в Арктике растет темпами, необъяснимыми с точки зрения приверженцев идеи глобального потепления, вызванного человеческой деятельностью. Однако чуть ранее, в 2007 г., И.Е. Фролов с коллегами (Фролов и др., 2007) убедительно показали, что основными причинами изменения климата Арктики являются естественные факторы циклической природы. Действительно, в природе Арктики отмечались как периоды потепления, так и периоды похолодания. Как правило, они чередовались (рис. 2). Такое чередование периодов хорошо описывается выделенным нами крупномасштабным циклом в колебаниях

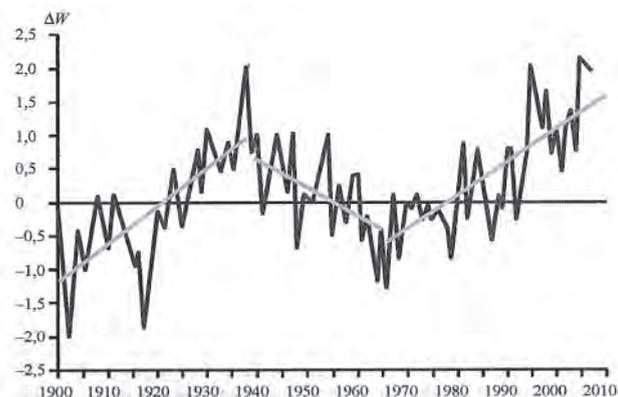


Рис. 2. Изменения аномалий среднегодовой температуры воздуха в Арктике с 1900 по 2010 г.

аномалий ледовитости Карского моря, продолжительностью 60 лет и амплитудой 48 %. Это вторая по значимости структурная организационная форма в колебаниях аномалий ледовитости, вслед за первой — трендом их векового понижения. Ветвь роста цикла оказалась продолжительностью 28 лет (с 1938 по 1966 г.), а ветвь спада — 32 года (1966–1998 гг.). При этом уточним терминологию цикла. Под ветвью его роста принят линейный тренд длиной от года наступления максимума отрицательной аномалии ледовитости до года наступления максимума ее положительной аномалии. Следовательно, ветвь роста проходит две стадии: стадию роста, находящуюся в области преобладания отрицательных аномалий ледовитости (от максимально отрицательной до нулевой), и стадию роста, продолжающуюся в области преобладания ее положительных аномалий (от нулевой аномалии до максимальной положительной). Ветвь спада аномалий ледовитости представляет линейный тренд длиной от года с максимальным значением положительной аномалии до года с максимально отрицательной ее аномалией. Эта ветвь также проходит две стадии, но только в обратном вышеописанному порядке.

Столь подробное объяснение сути цикла приведено с целью исключения возможных разнотолков в определении данного термина. Кроме того, под термином «ветвь роста» надо понимать линейный тренд в период развития процесса, направленный на замедление сокращения ледовитости. Он не представляет увеличение аномалий за счет «нарастания» льда. Поскольку в дальнейшем речь пойдет о росте аномалий ледовитости в летний период, необходимо ответить на вопрос, за счет чего этот рост происходит. В научной литературе объяснения по этому поводу отсутствуют. Попытаемся восполнить этот пробел. Прежде всего рост величины аномалии ледовитости за декаду равен разности аномалий и декадного приращения. Обратимся к выражениям аномалий ледовитости (в дальнейшем в сочетании «аномалия ледовитости» для упрощения слово ледовитость будет исключаться) по двум смежным декадам:

$$\Delta L_j = N_i - L_j, \Delta L_{j+1} = N_{i+1} - L_{j+1}.$$

Найдем их разность:

$$(L_i - L_{j+1}) - (N_j - N_{j+1}) = \Delta L_j - \Delta L_{j+1}.$$

Отсюда находим:

$$\Delta L_{j+1} = \Delta L_j + [(N_j - N_{j+1}) - (L_i - L_{j+1})],$$

или:

$$\delta = (N_j - N_{j+1}) - (L_i - L_{j+1}), \quad (4)$$

где N_j и N_{j+1} — средние многолетние значения ледовитости за j -ю и $j+1$ -ю декады; L_i и L_{j+1} — ледовитость за i -ю и $i+1$ -ю декады; ΔL_j и ΔL_{j+1} — аномалии за j -ю и за $j+1$ -ю декаду $\delta = \Delta L_{j+1} - \Delta L_j$. Все величины даны в процентах.

В формуле (4) выражена закономерность приращения декадных аномалий в течение лета при сезонном уменьшении их средних значений. Итак, обе ветви крупномасштабного цикла изменения аномалий, представленные трендами, имеют собственные линейные уравнения для каждой декады лета. Полагая, что повышение ледовитости вызывается синхронными понижениями температуры воздуха, рассчитаем уравнение ее тренда, воспользовавшись аномалиями среднегодовой температуры воздуха в Арктике (Дмитриев и др., 2011).

По выделенным на рис. 2 трендам найдем их линейные уравнения для ветвей роста и спада температуры воздуха:

$$\Delta T = -0,05\tau_1 + 97,8 \text{ (для периода с 1938 по 1966 г.),} \quad (5)$$

$$\Delta T = 0,0409\tau_2 - 81 \text{ (для периода с 1966 по 2011 г.),} \quad (6)$$

где τ_1 и τ_2 — искомые годы на линиях трендов.

Рассчитав по уравнениям (5) и (6) искомые годы и включив их в уравнения аномалий ледовитости для ветвей их роста и спада получим соответствующие уравнения связи между ΔL и ΔT . При этом, если линейные уравнения для ветвей понижения и роста температуры воздуха крупномасштабного цикла остаются неизменными для обеих частей моря, то уравнения аномалий ледовитости для каждой части моря различны и их следует определить по данным, рассчитанным по линейным уравнениям соответствующих трендов. В качестве примера результата связи расчета аномалий ледовитости с аномалиями температуры воздуха ниже приводятся уравнения их трендов для первой декады июля по северо-восточной части моря (7):

$$\Delta L_1 = 9,648 - 6,84\Delta T; \Delta L_2 = -32,2\Delta T + 14,0, \quad (7)$$

где ΔL_1 и ΔL_2 — аномалии на восходящей и нисходящей ветвей цикла, %.

Характерно, что крупномасштабный климатический цикл (Бородачев, 1998, 2014) формирует также изменения сроков взлома припая в юго-западной части Карского моря. Например, в период похолодания Арктики (1938–1966 гг.) в районе полярной станции о. Белый отмечалось постепенное запаздывание сроков взлома припая (ΔD), что видно из уравнения:

$$\Delta D = 0,846\tau - 1652, \quad (8)$$

а в период потепления наблюдались более ранние сроки взлома припая:

$$\Delta D = -0,6\tau + 1191,6. \quad (9)$$

Поскольку в летнее время льды не образуются, а тают и разрушаются, полученные линейные уравнения отражают природную зависимость ледовитости от температуры воздуха на уровне трендов и четко выделяют периоды похолодания и потепления Арктики. Общая формула связи аномалий с температурой воздуха (3) и приведенный пример расчета (7) отражают предложенные гипотезы влияния климата на долговременные колебания ледовитости. И все же подчеркнем, что эти гипотезы и выводы базируются на данных, рассчитанных по уравнениям линейных трендов. Тем не менее рис. 3 (Фролов и др., 2007) подтверждает наши выводы.

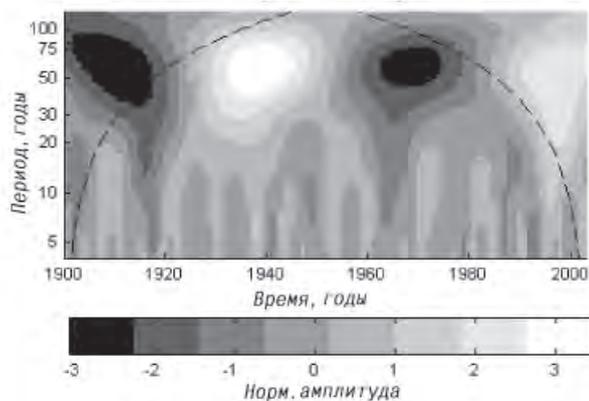


Рис. 3. Временной вейвлет-спектр аномалий среднегодовой температуры воздуха в зоне 75–85° с.ш. в XX в. (Фролов и др., 2007).

Центры чередующихся ядер потепления и похолодания климата Арктики, представленные на рисунке, практически близки к годам расположения минимумов и максимума крупномасштабного цикла. Примечательно, что продолжительность ветви понижения площади сократившихся за лето льдов (ПСЛ) (39 лет) длиннее ветви ее роста (33 года), ограниченную в данном случае 2008 годом (см. рис. 1). Однако скорость понижения ПСЛ ($V = 0,74$ %/год или $3,7$ тыс. км²/год) в 1,7 раза ниже скорости ее роста ($1,27$ %/год или $6,3$ тыс. км²/год). Дополнительно надо отметить, что параллельно выявленному крупномасштабному циклу изменения аномалий совершались долговременные колебания температуры воды на разрезе Кольского меридиана (Бородачев, 2014). Интересно заметить, что колебания аномалий более мелкого масштаба, наложенные на линейные тренды ветвей крупномасштабного цикла, в конце июля с 1938 по 1966 г. стали происходить с постепенно затухающей амплитудой на фоне общего повышения ледовитости. Затем с 1966 по 2011 г. наступил второй столь же длительный природный период колебаний аномалий ледовитости, но уже с их возрастающей амплитудой и повышенным уровнем отрицательных аномалий. Общий характер отмеченной особенности долговременных колебаний ледовитости напоминает гармонические колебания, у которых амплитуда и начальная фаза являются не постоянными величинами, а меняющимися функциями времени. Однако фактическое разнообразие в распределении величин аномалий ледовитости далеко от идеала, что не позволяет пока найти метод решения поставленной задачи. Кстати, упомянутый выше последний период колебаний с возрастающей амплитудой аномалий продолжается до настоящего времени, но есть основание предполагать изменение его ориентации в дальнейшем (Абдусаматов, 2009; Дмитриев и др., 2011; Фролов и др., 2007). Итак, чтобы рассчитать аномалию ледовитости за декаду любого года в период ее спада, нужно сначала определить аномалию температуры воздуха за этот же год по формуле (7), а затем полученное значение ΔT вставить в формулы соответствующего уравнения.

СОКРАЩЕНИЕ ПЛОЩАДИ ЛЬДОВ В КАРСКОМ МОРЕ

Площадь сократившихся за лето льдов представляется разницей между площадями максимальной и минимальной величин в их среднегодовом выражении. При этом если максимальная площадь принимается равной площади каждой части моря, то минимальная площадь ограничена сроком наступления нового ледообразования или временем полного очищения ото льдов. Поэтому в юго-западной части моря незначительные площади редких и разреженных льдов сохранились лишь в 13 годах за период с 1940 г. по 2011 г., а до нового ледообразования в этом районе остаточные льды сохранились только в 8 годах. Средняя многолетняя площадь сократившихся льдов в юго-западной части составляет 325 тыс. км². Сокращение площади льдов в северо-восточной части Карского моря происходило существенно замедленное, чем на его юго-западе, и в значительной степени определялось вариациями климата Арктики. Прежде всего, в долговременных колебаниях ПСЛ четко проявилась общая тенденция в изменении площади — ее устойчивое сокращение в XX — начале XXI вв. (рис. 4).

На рис. 4 показано, что линия тренда площади льдов, сократившихся за лето в северо-восточной части Карского моря, носит отрицательный знак. Это означает, что в XX — начале XXI вв. происходило постепенное уменьшение ПСЛ. Главная особенность в долговременных колебаниях ПСЛ хорошо выражена кривой полиномиального тренда. Она показывает, что практически до конца 1930-х гг. площадь

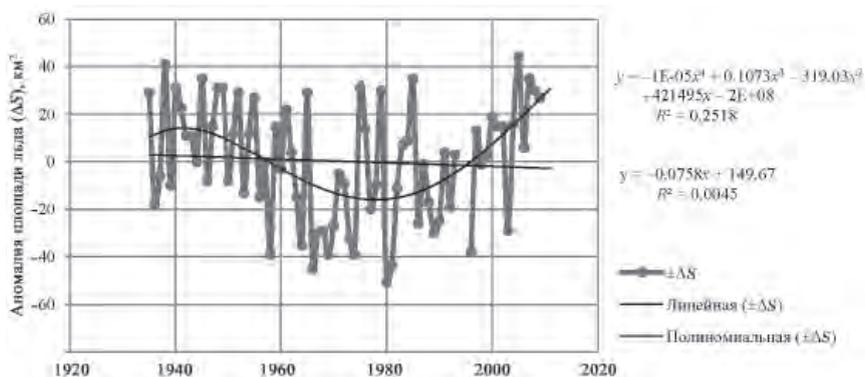


Рис. 4. Долговременные колебания аномалий среднегодовой площади сократившихся льдов в летний сезон.

сокращавшихся льдов увеличивалась. В последовавшие затем годы наступила длительная эпоха понижения среднегодовой площади льдов, сокращавшихся в летний сезон в северо-восточной части моря, которая по гипотезе полиномиального тренда, закончилась в 1976 г. Этот процесс накопления льдов за период с 1938 по 1976 г. может быть успешно выражен линейным уравнением тренда роста площади льдов в северо-восточной части моря, связанного с резким похолоданием климата Арктики. В доказательство приводится линейное уравнение связи между ПСЛ и температурой воздуха, рассчитанными по их линейным трендам:

$$\Delta S = 21,9\Delta T + 3. \quad (10)$$

Характерно, что выявленный линейный тренд изменения ПСЛ за указанный период близко соответствует тренду, представляющему выше ветвь роста крупномасштабного цикла ледовитости в этой части моря. После 1976 г., являющегося переломным, эпоха накопления льдов в Карском море сменилась на эпоху ежегодного сокращения их площади, которая продолжается до сих пор (рис. 4). Примечательно, что продолжительность ветви понижения ПСЛ (39 лет) длиннее ветви ее роста (33 года), ограниченной в данном случае 2008 годом (см. рис. 1). Однако скорость понижения ПСЛ ($V = 0,74$ %/год или $3,7$ тыс. $\text{км}^2/\text{год}$) в $1,7$ раза ниже скорости ее роста ($1,27$ %/год или $6,3$ тыс. $\text{км}^2/\text{год}$). Продолжительность этих двух эпох в долгосрочных колебаниях ПСЛ неодинакова. Есть вероятность того, что в ближайшие годы может наступить начало нового похолодания климата Арктики, в крайнем случае — климата Карского моря. Убедительные доводы в пользу этого изложены в работах Х.И. Абдусаматова (2009) и А.А. Дмитриева с коллегами (2011). Ежегодные аномалии ПСЛ в период ее непрерывного увеличения рассчитываются по уравнению линейного тренда:

$$\Delta S = 25,3 \Delta T - 14. \quad (11)$$

Окончательные расчеты показали, что в Карском море за летний сезон ежегодно исчезают льды площадью 618 тыс. км^2 , или $74,5$ % от площади моря. Конечно, было бы необходимым оценить взаимодействие процессов изменения площади льдов с гидрометеорологическими процессами, развивавшимися над Карским морем. Но для этого не хватает качественных натуральных материалов в должном количестве. Между тем анализ показал, что процесс уменьшения площади исчезающих за лето льдов в течение 1938–1976 гг. коррелирует с процессом неуклонного понижения повторяе-

мости W-формы, отражающей степень активности зональных процессов по атлантико-европейскому сектору (Дмитриев и др., 2011). Более того, в 1976 г. отмечался минимум площади сократившихся льдов за лето в Карском море, и в этот же год был достигнут абсолютный минимум за 120 лет повторяемости W-формы атмосферной циркуляции. Но, как доказывается выше, долговременные колебания ПСЛ зависят от вариаций климата, т.е. температуры воздуха Арктики. Отсюда открывается цепочка соподчиненных процессов: снижение (повышение) повторяемости W-формы атмосферной циркуляции приводит к понижению (повышению) температуры воздуха Арктики, что вызывает уменьшение (увеличение) ПСЛ. Однако такое соподчинение ледово-синоптических процессов воспринимается пока на уровне гипотезы, а не доказательной теории. В развитии и углублении данного направления исследований открывается обширное поле деятельности для пытливых и целеустремленных умов.

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.* Лды Карского моря. СПб.: Гидрометеоздат, 1998. 182 с.
- Бородачев В.Е., Бородачев И.В.* К вопросу о климатических периодах и циклах ледовитости Баренцева моря // Экспресс-информация. 2014. Вып. 40. 56 с.
- Визе В.Ю.* Основы долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей // Тр. ААНИИ. 1944. Т. 190. 273 с.
- Витинский Ю.И.* Солнечная активность. М.: Наука, 1983. 192 с.
- Волков Н.А., Слепцов-Шевлевич Б.А.* О цикличности в колебаниях ледовитости арктических морей // Тр. ААНИИ. 1971. Т. 303. С. 5–305.
- 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.: Гидрометеоздат, 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.
- Карклин В.П.* 22-летние колебания поля атмосферного давления в умеренных и высоких широтах в зимнее время // Тр. ААНИИ. 1973. Т. 307. С. 133–141.
- Карклин В.П., Ковалев Е.Г.* Влияние солнечной активности на формирование крупных аномалий ледовитости арктических морей // Тр. ААНИИ. 1994. Т. 432. С. 28–35.
- Кириллов А.А., Спичкин В.А.* Методика прогноза распределения льдов в юго-западной части Карского моря // Тр. ААНИИ. 1973. Т. 307. С. 79–82.
- Мионов Е.У.* Ледовые условия в Гренландском и Баренцевом морях и их долгосрочный прогноз. СПб.: ААНИИ, 2004. 314 с.

Николаев Ю.В., Сарухян Э.И. Применение метода главных компонент в изучении многолетних колебаний ледовитости арктических морей // Тр. ААНИИ. 1973. Т. 307. С.103–111.

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

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

KARA SEA ICE EXTENT AND THE ARCTIC CLIMATE VARIATIONS

This article provides an analysis of the long-term fluctuations of the Kara Sea ice extent associated with the Arctic climate variations. It has been shown that its secular ice extent downgrade is determined by the global warming, which trend magnitude $+0,01355$ grad/year. A paradoxical phenomenon is found out — a natural decrease in ice extent in the north-eastern part of the sea up to the second 10-days period of July with further abrupt change to increase in ice extent with remaining background global warming of the Arctic. A large-scale cycle, typical of both parts of the Kara Sea, is revealed in the long-term fluctuations of the ice extent, the formation of the cycle is due to cyclical changes in the Arctic climate. It is shown that the processes of cooling and warming of the Arctic have defined sharply delineated periods of accumulation and reduction the summer ice area in the Kara Sea. There is no doubt that the processes of interaction between the ice covering such a small area of the Kara Sea and climate in the Arctic are planetary.

Keywords: sea ice, ice extent, climate, Kara Sea.