

УДК 551.326(98)

ЛЕДОВЫЕ УСЛОВИЯ МОРЕЙ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ В СВЯЗИ С ПРОИСХОДЯЩИМИ КЛИМАТИЧЕСКИМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ И ОСОБЕННОСТИ ЭВОЛЮЦИИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА В 2021 ГОДУ

© 2022 г. А. С. Макаров^{1, *}, Е. У. Миронов^{1, **}, В. В. Иванов^{1, ***}, А. В. Юлин^{1, ****}

¹ФБГУ “Арктический и антарктический научно-исследовательский институт”,

Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: makarov@aari.ru

**e-mail: mir@aari.ru

***e-mail: v_ivanov@aari.ru

****e-mail: icefor@aari.ru

Поступила в редакцию 09.12.2021 г.

После доработки 17.01.2022 г.

Принята к публикации 14.04.2022 г.

Выполнен анализ многолетней изменчивости ледовых условий в морях Российской Арктики и площади льдов Северного Ледовитого океана. Показано, что ледовые условия российских арктических морей во многом определяются крупномасштабными атмосферными процессами и развитием ледяного покрова в Северном Ледовитом океане. Показано, что наблюдаются значительные изменения в характере изменчивости ледовитости российских арктических морей, которые позволяют выделить два различающихся периода – 1946–2004 гг. и 2005–2021 гг. Выявлено, что в последний 17-летний период значительно возросла повторяемость полного очищения акватории российских арктических морей по сравнению с предыдущими периодами.

Ключевые слова: ледяной покров, Северный Ледовитый океан, ледовитость, российские арктические моря, атмосферные процессы, формы циркуляции атмосферы

DOI: 10.31857/S0030157422050124

ВВЕДЕНИЕ

Ледяной покров морей Российской Арктики, по которым проходит трасса Северного морского пути (СМП), является периферийной частью массива льдов Северного Ледовитого океана (СЛО). Открытая северная граница морей и свободный водо- и ледообмен с океаном оказывает значительное влияние на ледовитость в этих морях. Ледяной покров российских арктических морей, испытывающий с одной стороны влияние Арктики, а с другой – влияние евразийского материка, имеет как характерные специфические, так и характерные сходные черты, связанные с изменением ледяного покрова СЛО. В этой связи ледяной покров российских арктических морей необходимо рассматривать в тесной связи с развитием ледяного покрова в СЛО.

К СЛО в настоящее время обращено пристальное внимание исследователей. Характерной чертой развития ледяного покрова СЛО является устойчивая тенденция к сокращению площади льдов в океане как в зимний, так и в летний сезоны года. Сокращение площади ледяного покрова

приводит к увеличению пространств чистой воды и, в свою очередь, к значительным изменениям в тепловом балансе системы “атмосфера–лед–океан”.

По сравнению с 1970–1980-ми годами, площадь льдов в зимний сезон сократилась на 600–700 тыс. км², а в летний сезон – на 2500–3000 тыс. км². В последнее десятилетие с 2011 по 2020 гг. акватория СЛО в летний сезон начала очищаться почти на 2/3 (т.е. на 68%) своей акватории. В настоящее время существуют различные гипотезы и модели дальнейшего развития ледяного покрова СЛО. Еще до начала XXI века у ряда исследователей существовало мнение, что изменение площади льдов в СЛО носит колебательный характер с периодом колебаний 30–35 лет. Ожидалось, что в период между 2015–2020 гг. будет вновь наблюдаться цикл похолодания и увеличение площади ледяного покрова [9, 20, 21]. Однако этого не произошло, а уменьшение площади льдов в СЛО, которое наблюдается в настоящее время, носит более глубокий по величине характер. По своей величине оно значительно превосходит уменьшение площади льдов в океа-

не, которое наблюдалось в предшествующий период потепления в 20–50-х годах прошлого века.

Многочисленные исследования ледяного покрова СЛО убедительно показали, что уменьшение площади льдов имеет глобальный характер как по величине, так и по продолжительности [1, 2, 13, 25]. Ряд авторов считают, что в ближайшем будущем ледяной покров в СЛО может вообще стать сезонным [12, 22, 24]. Кроме уменьшения площади льдов, в СЛО наблюдается общее уменьшение возрастного состава льда. В последнее пятилетие соотношение между старыми и однолетними льдами в СЛО в конце зимнего сезона составляет примерно 37% и 63% соответственно [5, 12, 22]. Такие глобальные изменения в площади и составе льдов в СЛО не могли не отразиться на ледовых условиях российских арктических морей. Целый ряд исследований ледового режима российских арктических морей показывают, что изменения, произошедшие за последние 10–20 лет, действительно очень значимы [10, 17, 19, 23]. Учитывая особую геополитическую и экономическую значимость трассы Северного морского пути, который проходит в акватории российских арктических морей, изучение изменчивости их ледовых условий является стратегической задачей.

Целью настоящего исследования является более детальное изучение происходящих изменений в ледяном покрове морей Российской Арктики в летний сезон года, по которым проходит трасса СМП (моря Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское). Представляет также интерес рассмотрение особенностей развития гидрометеорологических и ледовых условий в арктических морях в летний сезон 2021 года, в котором наблюдалось экстремальное развитие ледовых условий по целому ряду показателей – сроки очищения морей ото льдов, ледовитость морей в летний сезон года.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В РАБОТЕ ДАННЫЕ

В работе используется массив данных Мирового центра данных по морскому льду (МЦД МЛ), основой которого являются данные с дискретностью 1–2 суток пассивного микроволнового зондирования Северной полярной области SSMR-SSM/I-SSMIS по алгоритму NASATEAM, копируемые МЦД МЛ из архива данных “Национального центра данных США по снегу и льду” (NSIDC). Эти данные охватывают период с 26.10.1978 г. по настоящее время [16]. В работе также используются среднемесячные значения площади льда в СЛО за ряд наблюдений с 1978 г. до осеннего периода 2021 г. Таким образом, межгодовая изменчивость площади льдов в океане и морях рассматривается за 44-летний ряд наблюдений.

Сезонная изменчивость площади льдов в морях рассматривается за более длинный ряд наблюдений, с 1946 по 2020 гг. Это связано с тем, что наблюдения в арктических морях за ледовой обстановкой стали регулярными с середины 1940-х годов. Основой этих наблюдений были авиационные ледовые разведки. Начиная с конца 1970-х годов, ледовые авиаразведки постепенно прекратились, и их заменили спутниковые наблюдения. Имеющийся архив данных позволяет рассмотреть непрерывный ряд наблюдений за ледовитостью арктических морей России, по которым проходит трасса СМП, начиная с 1946 г. по настоящее время (длина рядов фактических наблюдений составляет 75 лет). Ледовитость каждого моря используется в границах морей, принятых в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте (ААНИИ) в конце 1930-х годов. Они несколько отличаются от принятых в 1960 г. официальных границ океанов и морей [7]. Площади морей в границах ААНИИ составляют: Карское – 830 тыс. км², Лаптевых – 536 тыс. км², Восточно-Сибирское – 770 тыс. км² и Чукотское – 266 тыс. км². Архив данных доступен на сайте ААНИИ по ссылке [13].

АТМОСФЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АРКТИКЕ В СОВРЕМЕННОМ КЛИМАТИЧЕСКОМ ПЕРИОДЕ

В ряде работ [3, 6, 12] убедительно показано, что перестройки крупномасштабных атмосферных процессов в системе общей циркуляции атмосферы (ОЦА) закономерно связаны с периодами потеплений и похолоданий в Арктике. Результаты мониторинга структурных изменений ОЦА по 26-ти разновидностям основных форм циркуляции E, W, C по классификации Г.Я. Вангенгейма [4] в период с 1979 по 2021 гг. показали, что после 2004 г. произошла крупномасштабная перестройка в циркуляции атмосферы от преобладания западной (зональной) формы (1979–2003 гг.) к восточной (меридиональной) форме циркуляции (рис. 1). Это отразилось на смене знака в длительности развития тенденций многих метеорологических и гидрологических показателей.

Наряду с другими метеорологическими показателями, температура воздуха и атмосферное давление играют важную роль в формировании гидрометеорологических процессов, так как являются интегрирующими факторами природно-климатических особенностей как полярного района в целом, так и локальных его регионов.

В данной работе расчеты среднегодовых значений метеорологических показателей температуры и давления проводились по данным диагноза глобальной прогностической системы метеослужбы США (NOAA и NWS). Расчеты значений

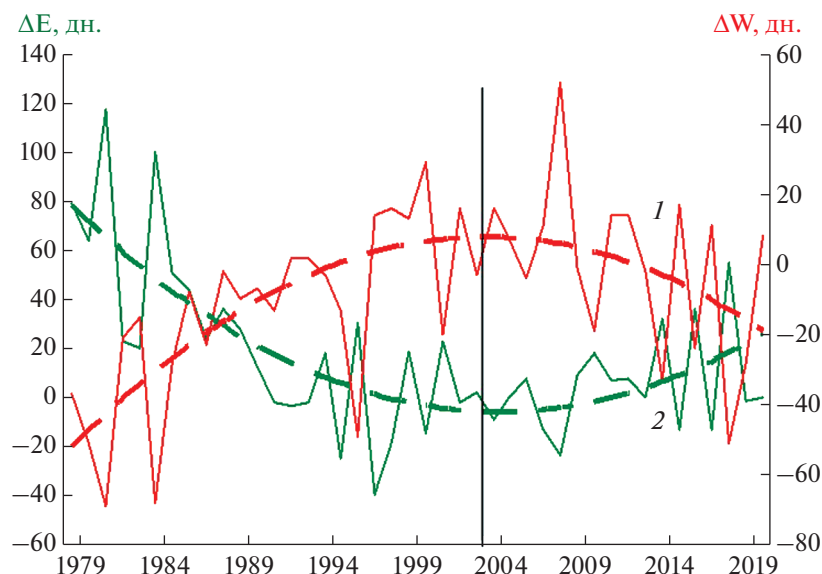


Рис. 1. Аномалии годового числа дней с западной (1) и восточной (2) формами циркуляции с 1979 по 2021 гг. по классификации Г.Я. Вангенгейма (пунктирные линии – тренды, выраженные аппроксимирующими полиномами третьей степени).

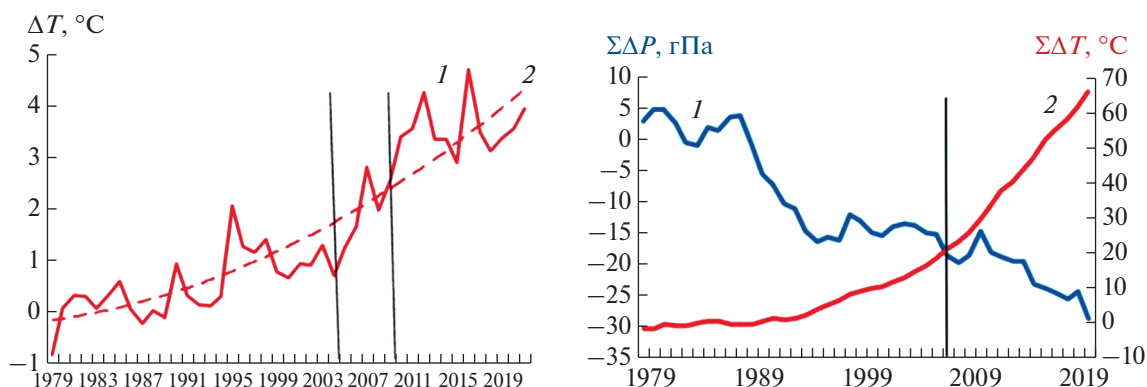


Рис. 2. Многолетние изменения средних годовых значений аномалий температуры воздуха (1) и ее аппроксимация полиномом шестой степени (2) (слева) и интегральные кривые аномалий среднегодовых значений атмосферного давления (1) и температуры воздуха (2) (справа) в период с 1979 по 2021 гг.

аномалий температуры воздуха и давления проводились относительно норм за период с 1961 по 1990 гг. Для ретроспективного анализа климатических условий и периодов потепления и похолодания в Арктике были использованы среднемесячные и среднегодовые значения аномалий температуры воздуха, рассчитанные в узлах регулярной сетки ($5^\circ \times 10^\circ$) в широтной полосе 70° – 85° с.ш. вокруг всего арктического региона.

Анализ многолетней изменчивости годовых и средних месячных значений аномалий давления в Арктике проводился по данным осредненных аномалий давления, рассчитанных в узлах регулярной сетки ($5^\circ \times 10^\circ$) в широтной полосе 80° – 85° с.ш., т.е. для зоны наиболее частого влияния

Арктического антициклона в приполюсном районе. Среднегодовые значения аномалии температуры воздуха для полярного района Арктики в широтной полосе 70° – 85° с.ш., а также интегральные кривые аномалий среднегодовых значений температуры воздуха и атмосферного давления в широтной полосе 80° – 85° с.ш за период с 1979 по 2001 гг. представлены на рис. 2.

Как видно из данных рис. 2, формирование положительных аномалий температуры воздуха в Арктике в период с 1979 по 2021 гг. было сопряжено с преобладанием отрицательных аномалий атмосферного давления в этих широтных поясах. Понижение фона давления в приполюсном районе отмечается при более частом смещении цикло-

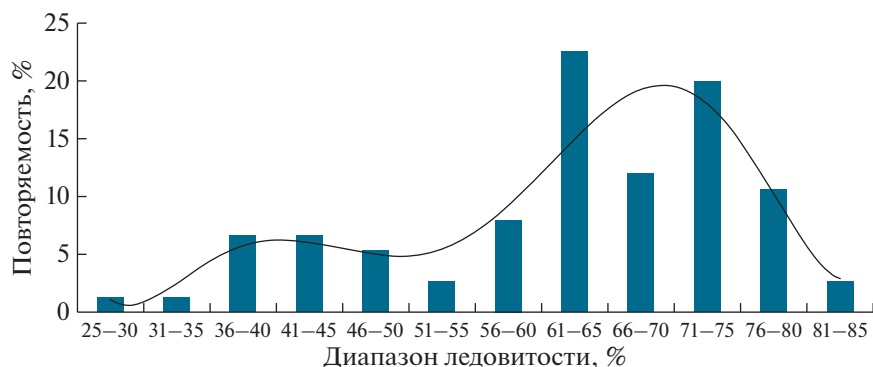


Рис. 3. Распределение суммарной ледовитости российских арктических морей в летний сезон (июнь–сентябрь).

нов в системе Исландского циклона по сравнению с нормой по высокоширотным траекториям. При увеличении положительных аномалий давления отмечается усиление Арктического антициклона. В данном случае циклоны смещаются по более низким траекториям и не оказывают существенного влияния на полярный район Арктики в указанных широтных поясах. Такая связь характерна для всех периодов потепления, имевших место в Арктике, и наиболее четко она проявилась в метеорологических процессах последнего десятилетия. Текущее потепление в Арктике в период 1979–2004 гг. сопоставимо с потеплением 1930-х годов. После 2004 г. произошло особенно резкое повышение температуры воздуха, когда потепление в Арктике охватило все сезоны года.

Межгодовые колебания температуры воздуха последнего десятилетия происходят на высоком температурном фоне. На данный момент мы находимся, возможно, вблизи его максимальных значений. После 2016 г. наметились незначительная тенденция к понижению температурного фона в Арктике и стабилизация в направленности атмосферных процессов, пока с преобладанием высокоширотных траекторий циклонов. Автоколебательный процесс усиления и ослабления зональной и меридиональной циркуляций является общим свойством всех систем последовательности восходящей, стационарной и нисходящей стадий развития. Чередование разновидностей основных форм атмосферной циркуляции с высокоширотными и низкоширотными траекториями в системе общей циркуляции атмосферы определяется, главным образом, состоянием длинных термобарических волн на южной периферии циркумполярного вихря. Однако необходимо понимать, что в случае усиления разновидностей форм циркуляции с низкоширотными траекториями циклонов в системе Исландского и Алеутского минимумов произойдет усиление Арктического антициклона и повышение фона атмосферного давления до положительных аномалий в поляр-

ном районе. В этом случае возможно понижение фона температуры воздуха по сравнению с текущим периодом, а также не исключено возможное повышение площади льда СЛО. Однако текущий характер развития крупномасштабных атмосферных процессов пока не обнаруживает признаков кардинальной перестройки атмосферной циркуляции, что могло бы привести к устойчивому похолоданию в полярном районе Арктики.

МЕЖГОДОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПЛОЩАДИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА В АРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ И СЛО

Основным индикатором состояния ледяного покрова в летний сезон года является ледовитость морей. Под ледовитостью моря понимается площадь, занятая всеми льдами, в процентах от общей площади моря. Наиболее информативно развитие ледяного покрова в летний период отражает суммарная ледовитость морей за период июль–сентябрь. На рис. 3 приведена эмпирическая функция распределения суммарной ледовитости морей в летний период за ряд наблюдений в 75 лет. Из приведенного графика следует, что распределение не соответствует нормальному, сильно смещено в сторону больших значений и имеет двухмодальный характер. Первая мода ледовитости составляет около 70% и характеризует состояние морей с повышенным фоном. Вторая мода составляет около 40% и характеризует состояние морей при малой ледовитости.

В табл. 1 приведены основные статистические показатели суммарной ледовитости для российских арктических морей. Из приведенных данных следует, что наибольшие колебания ледовитости наблюдаются в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском. В этих морях амплитуда колебаний составляет 72 и 85%, а значение среднеквадратического отклонения (СКО) — 18.5 и 19.3% соответственно. Наименьшие колебания ледовитости характерны для морей Карского и Чукотского. В этих морях, которые занимают крайнее поло-

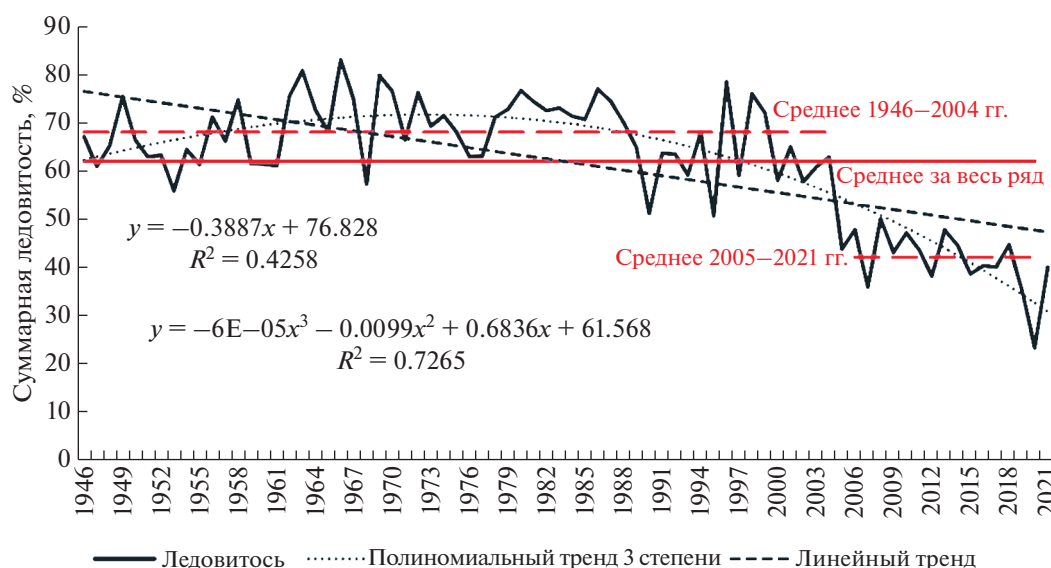


Рис. 4. Межгодовое изменение суммарной ледовитости российских арктических морей в летний сезон (июнь–сентябрь).

жения и в большей степени зависят от теплых течений и воздушных масс Атлантического и Тихого океанов, амплитуда колебаний составляет 60 и 76%, а значение СКО – 13.0 и 17.4% соответственно (табл. 1).

На рис. 4 приведен график межгодовых изменений суммарной ледовитости для четырех российских арктических морей в летний сезон (июль–сентябрь) за период наблюдений с 1946 по 2021 гг. (76 лет).

Из приведенного графика межгодовых изменений ледовитости следует ряд очень важных выводов:

- наблюдается хорошо выраженный и статистически значимый (для уровня значимости 0.01%) линейный тренд уменьшения ледовитости, составляющий около 30% за весь ряд наблюдений, или 4% за десятилетие;

- среднеегодовое значение ледовитости для всего ряда наблюдений 1946–2021 гг. не дает

правильного представления о среднемноголетней величине как наиболее часто повторяющегося значения, на которое можно ориентироваться, и вызывает необходимость проверки ряда на стационарность;

- межгодовые изменения суммарной ледовитости хорошо описываются полиномом 3-й степени, который позволяет учесть до 72% общей дисперсии колебаний;

- аппроксимация полиномом 3-й степени позволяет выделить три периода изменений суммарной ледовитости, характеризующихся пониженным фоном (до конца 1950-х гг.), повышенным фоном (с начала 1960-х до конца 1980-х гг.) и вновь пониженным фоном (с начала 1990-х гг. до настоящего времени), которые также выделялись целым рядом авторов [9, 21, 23];

- последний период уменьшения ледовитости (2005–2020 гг.) носит настолько экстремальный характер, что произошедшие изменения уже нельзя считать простым понижением фона ледовитости.

Таблица 1. Основные статистические показатели суммарной ледовитости российских арктических морей в летний сезон за весь ряд наблюдений с 1946–2021 гг., %

Статистическая характеристика	Моря				Суммарная ледовитость
	Карское	Лаптевых	Восточно-Сибирское	Юго-запад Чукотского	
Среднее	45	49	71	41	62
Минимум	9	4	25	13	23
Максимум	85	89	97	70	83
Амплитуда	76	85	72	58	60
СКО	17.4	19.3	18.5	13.9	13.0

Таблица 2. Статистические характеристики ледовитости за различные временные периоды

Статистическая характеристика	Суммарная ледовитость		
	за период 1946–2004 гг.	за период 2005–2021 гг.	уменьшение
Среднее	68	42	–26%
Минимум	51	23	–28%
Максимум	83	50	–23%
Амплитуда	32	27	–5%
СКО	7.4	6.5	–0.9%

Существенные отличия в ледовитости арктических морей с 2005 г. нуждаются в проверке исследуемого ряда на стационарность (неизменность статистических характеристик ряда по времени). В нашем случае весь имеющийся ряд наблюдений был разбит на 2 выборки: с 1946 по 2004 гг. (выборка из 59 значений) и с 2005 по 2021 гг. (выборка из 17 значений). Неравнозначность выборок не противоречит условиям проверки стационарности ряда.

Обе выборки были проверены на стационарность по математическому ожиданию и дисперсии. Проверка гипотезы о стационарности математического ожидания по *t*-критерию Стьюдента показала, что эмпирическое значение критерия оказалось больше критического значения для уровня значимости 0.01%. Это дает основание отвергнуть гипотезу о стационарности ряда и признать, что различия в средних значениях двух рассмотренных выборок статистически значимы. В результате выполненной проверки можно утверждать, что среднее значение ледовитости второго ряда (период 2005–2021 гг.) значительно отличается от среднего значения ледовитости первого ряда (период 1946–2004 гг.).

Проверка гипотезы о равенстве дисперсий двух выборок с использованием *F*-критерия Фишера показала обратный результат. Эмпирический критерий оказался меньше критического значения, чтобы подтвердить рассмотренную гипотезу. Сравнение дисперсий двух выборок показало, что изменчивость ледовитости за периоды наблюдений 1946–2004 гг. и 2005–2021 гг. не отличаются друг от друга. Различие в дисперсии (т.е. в степени изменчивости) статистически незначимо для уровня значимости 0.01%. Весь ряд наблюдений в период 1946–2021 гг. по дисперсии является стационарным. Таким образом, наблюдаются значительные изменения в ледовитости российских арктических морей, которые позволяют выделить два различающихся периода: 1946–2004 гг. и 2005–2021 гг.

Средний уровень ледовитости, на фоне которого происходили межгодовые колебания, с 2005 года резко уменьшился. Если среднесезонная ледовитость в первом периоде составила 68%

в диапазоне колебаний от 51 до 83%, то во втором периоде среднесезонная ледовитость составила 42% (уменьшение – 26% или в 1.6 раза) при диапазоне колебаний от 23 до 50%. Амплитуда межгодовых колебаний и СКО уменьшились менее значительно – в 1.2 раза (табл. 2).

При сохранении амплитуды колебаний во втором периоде наблюдений (2005–2021 гг.) можно констатировать, что в этом периоде они происходят на низком уровне ледовитости. Сформировавшаяся тенденция устойчива и сохраняется весь последний период 2005–2021 гг.

Существенные изменения общего фона ледовитости российских арктических морей в период с 2005 г. по настоящее время требуют внимательного изучения и сравнения с изменениями, происходящими в СЛО. Для сравнения многолетних изменений площади льдов в СЛО и российских арктических морях использованы значения площади льдов в тыс. км² для СЛО и суммарная площадь льдов в августе от Карского до Чукотского моря. Значения площади льдов в августе являются наиболее информативными для летнего сезона для арктических морей. В начале сентября площадь льдов в арктических морях, особенно при легком типе развития ледовых условий, приближается к нулю, то есть выравнивается и, таким образом, не отражает ход развития в летнем сезоне. Площадь льда в морях в августе связана с ледовыми условиями июля и сентября (коэффициенты корреляции – порядка 0.9). Данные по межгодовому ходу изменения площади льдов в СЛО и российских арктических морях приведены на рис. 5.

Из приведенного графика следует, что все основные черты климатического изменения площади льдов в СЛО последнего периода находят свое отражение в площади льдов в российских арктических морях, общая площадь которых составляет около 3100 тыс. км². Оценка корреляционной связи двух рядов дает коэффициент корреляции 0.93. Оценка корреляционной связи площади льдов в СЛО с площадью льдов Северо-Европейского бассейна (Гренландского и Баренцева, общая площадь которых составляет около

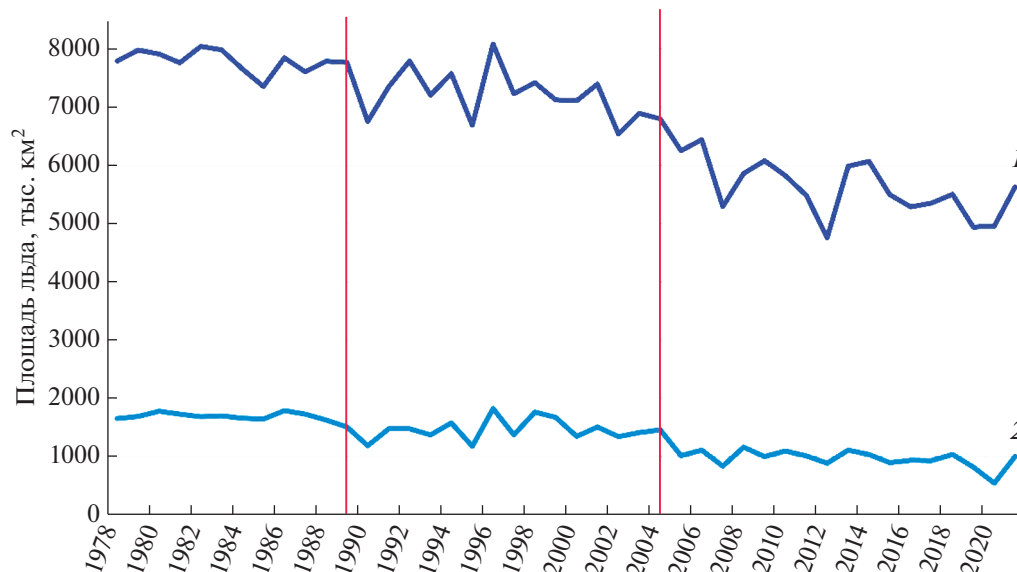


Рис. 5. Межгодовой ход площади льдов в СЛО (1) и российских арктических морях (2) в августе, тыс. км².

2630 тыс. км²) и аляскинского бассейна (Чукотского и Бофорта, общая площадь – чуть больше 1070 тыс. км²) в августе соответственно составляют 0.53 и 0.82.

Из приведенных оценок следует, что ледяной покров российских арктических морей в летний период практически синхронно отражает все основные черты изменений, происходящие в СЛО и характеризует основной вклад ледовитости российских арктических морей в общую дисперсию сезонной изменчивости площади льдов в СЛО (коэффициент детерминации – 0.86). При площади ледяного покрова в СЛО в 7500–8000 тыс. км² (уровень, который наблюдался до конца 1980-х годов) площадь льдов в морях составляла около 1700 тыс. км² (суммарная ледовитость морей – 70%). При площади в 7000–7500 тыс. км² (уровень, который наблюдался с начала 1990-х годов до 2004 г.) площадь льдов в морях составляла около 1500 тыс. км² (ледовитость – 60%). Наконец, в последний период 2005–2021 гг., при снижении площади льда в СЛО до 5000–6000 тыс. км², площадь льдов в морях составляла около 1000 тыс. км² (ледовитость – около 40%). Это означает, что в последний из рассматриваемых периодов в российских арктических морях, по которым проходит трасса СМП, начиная с августа, более половины акватории очищается ото льдов. Быстрое и интенсивное разрушение периферии ледяного массива СЛО, которое наблюдается с начала нынешнего столетия и известно как “арктическое усиление”, напрямую влияет на улучшение навигационной обстановки на трассе СМП. Таким образом, основной вывод, который можно сделать из сравнения приведенных данных, состоит в

том, что любое ожидаемое в будущем изменение в площади ледяного покрова в СЛО приведет к изменению в ледовитости российских арктических морей в сторону увеличения или уменьшения.

ИЗМЕНЕНИЕ СЕЗОННОГО ХОДА ЛЕДОВИТОСТИ В АРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ

Наибольший практический интерес вызывают изменения ледовых условий в тех российских арктических морях, по которым проходит трасса СМП. Значения ледовитости в конце периода нарастания ледяного покрова (конец мая) близки к 90–100%. Пространства чистой воды формируются в основном за счет развития заприпайных полыней, что характерно для морей Лаптевых и Восточно-Сибирского. В Карском и Чукотском морях обширные зоны чистой воды также могут развиваться в связи с выносом тепла из Атлантического и Тихоокеанского регионов. На рис. 6 приведен сезонный ход ледовитости арктических российских морей в летний сезон для каждого из рассматриваемых временных периодов.

Характерной чертой наблюдаемых изменений является существенное увеличение интенсивности и смещение сроков очищения морей ото льдов в раннюю сторону. Эта особенность развития летних ледовых условий ранее уже отмечалась рядом авторов [8, 11, 15, 22]. Уже в самом начале летнего сезона ледовитость морей Карского, Лаптевых и Чукотского составляет в среднем на 8–12%, а Восточно-Сибирского моря на 3–5% меньше нормы, что свидетельствует о более раннем начале таяния в период 2005–2021 гг. (рис. 6).

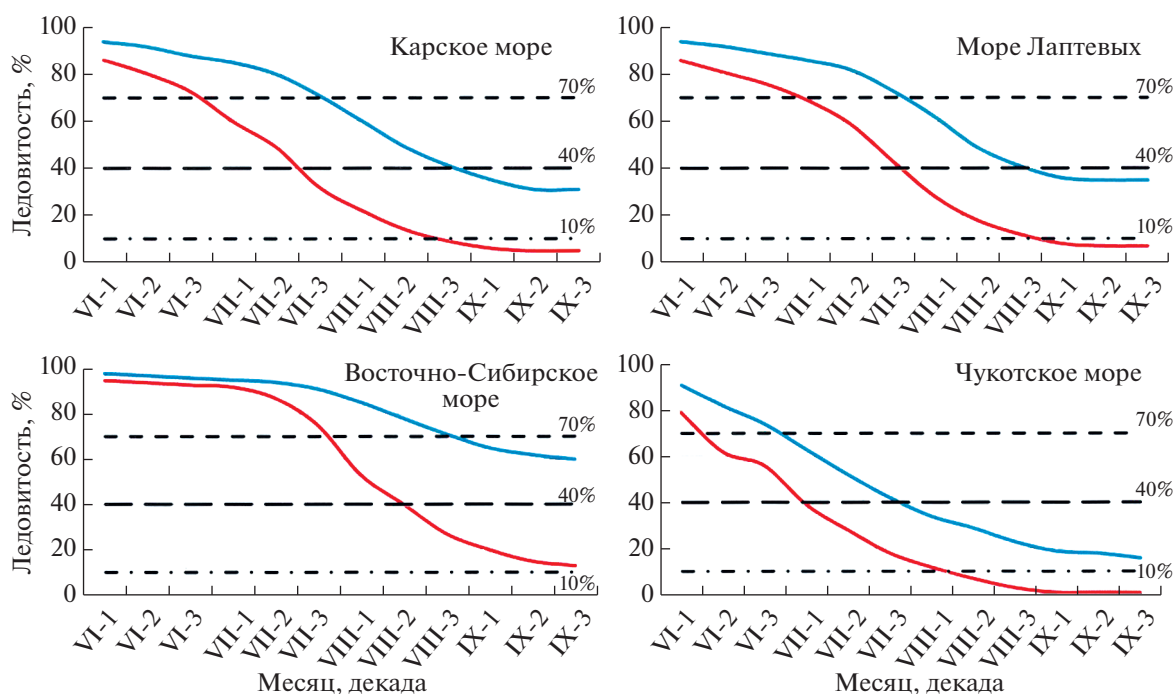


Рис. 6. Сезонный ход ледовитости российских арктических морей в периоды 1946–2004 гг. (синяя линия) и 2005–2021 гг. (красная линия), %.

Изменение ледовитости морей характеризуется несколькими важными моментами. Согласно критериям, установленным в Правилах плавания по трассам СМП [18], при уменьшении ледовитости до 70% прибрежные участки плавания в морях становятся доступными для судов всех ледовых классов. В морях Карском и Лаптевых ледовитость в 70% в среднем достигается в начале июля, в Восточно-Сибирском – в начале августа, в юго-западной части Чукотского моря – в середине июня (рис. 6). Самое важное заключается в том, что в период 2005–2021 гг. это событие стало в среднем наступать на 25–30 суток раньше, чем в предшествующий период.

Вторым важным событием в очищении морей ото льдов является уменьшение ледовитости до 30–40%. В этом случае очищается 2/3 акватории моря и становится возможным использование практически всех стандартных маршрутов плавания (прибрежных, центральных и мористых). В среднем в морях Карском и Лаптевых это событие наступает в конце июля–начале августа, в Восточно-Сибирском море – в середине августа, в юго-западной части Чукотского моря – в начале июля. В период 2005–2021 гг. это событие стало в среднем наступать на 30 суток раньше, чем в предшествующий период.

Практически полное очищение морей ото льда (достижение ледовитости 10% и менее) в период 2005–2021 гг. в среднем наступает в начале сентября. Повторяемость полного очищения ото

льда в морях Карском и Чукотском составляет 90%, в море Лаптевых – 75% и в Восточно-Сибирском – 60%. Оценка повторяемости полного очищения (достижение ледовитости 10% и менее) в период 1946–2004 гг. составила для морей Карского и Лаптевых 20%, для Восточно-Сибирского – 15% и для юго-западной части Чукотского моря – 40%. Эти оценки означают, что если в период 1946–2004 гг. полное очищение морей ото льда было редким явлением, повторяемость которого не превышала 20%, то в текущий период 2005–2021 гг. полное очищение для юго-западных частей Карского и Чукотского морей наступает практически всегда. Для северо-восточной части Карского моря, морей Лаптевых и Восточно-Сибирского повторяемость полного очищения акваторий ото льда составляет более 60%.

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ И ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ В РОССИЙСКИХ АРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ В 2021 г.

В 2020 г. наблюдалось экстремальное очищение российских арктических морей ото льда за весь ряд наблюдений с 1946 г. Общая площадь льдов в августе составляла около 500 тыс. км², а суммарная ледовитость всех морей за июль–сентябрь составила 23% [14]. Такое беспрецедентное уменьшение ледовитости в летний сезон в 2020 г. вызывает необходимость рассмотреть по-

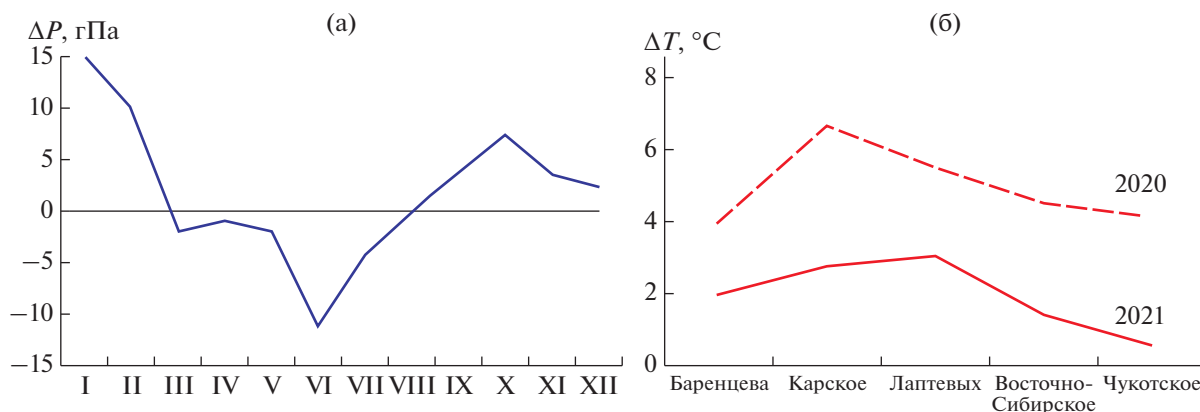


Рис. 7. Значения аномалий атмосферного давления (гПа) в широтном поясе 80° – 85° с.ш. (а) и средние годовые аномалии температуры воздуха по акватории российских арктических морей ($^{\circ}\text{C}$) (б) в январе–декабре 2020 и 2021 гг.

следующее развитие ледяного покрова в морях, в частности, ледовые условия в летний сезон 2021 г.

В 2021 г. атмосферные процессы в Северной полярной области развивались на фоне повышенной повторяемости в большинстве месяцев крупномасштабных атмосферных процессов восточной (E) формы циркуляции. Меридиональные процессы С формы циркуляции превышали норму в марте, апреле и сентябре. По сравнению с прошлым 2020 г., наблюдалось уменьшение зональных процессов западной (W) формы циркуляции. В период с января по июнь 2021 г. отмечалась устойчивая от месяца к месяцу тенденция к понижению фона атмосферного давления. В январе – марте наблюдалось преобладание крупных положительных аномалий атмосферного давления, которые с марта по июнь перешли к отрицательным значениям аномалий. В последующий период фон атмосферного давления имел тенденцию к повышению до положительных аномалий в сентябре (рис. 7). Под влиянием Арктического антициклона наиболее крупные значения с положительными аномалиями (10–16 гПа) имели место в январе и феврале 2021 г. Наиболее активная циклоническая деятельность в полярном районе наблюдалась в июне. Фон атмосферного давления понижался до крупных отрицательных аномалий давления (минус 10–12 гПа) (рис. 7).

В 2021 г. на полярный район оказывали частое влияние блокирующие гребни континентального антициклона и, по сравнению с прошлым 2020 г., отмечалось ослабление циклонической деятельности. В среднем за летний сезон двух последних лет фон атмосферного давления повысился на 4.6 гПа: от отрицательной аномалии минус 3.7 гПа в 2020 г. до положительной аномалии 0.9 гПа в 2021 г. В среднем за период январь–сентябрь 2021 г. аномалия температуры воздуха над полярным районом была выше нормы на 2.9°C . Однако при сравнении с аномалиями температуры возду-

ха за этот же период 2020 г. в текущем году наблюдается понижение аномалии на 0.4°C .

В российских арктических морях в 2021 г. также сформировались положительные аномалии температуры воздуха. Наиболее высокие аномалии температуры воздуха отмечались в морях Лаптевых и Карском, а наиболее низкие – в морях Восточно-Сибирском и Чукотском. По сравнению с 2020 г. в среднем по всем морям аномалии температуры воздуха понизились на 1.4°C , но вместе с тем оставались положительными (рис. 7).

В конце периода зимнего нарастания ледяного покрова (апрель–май) в СЛО преобладали однолетние льды (преимущественно однолетние толстые и средние), которые составляли около 60% от общего количества льда. Около 35% от общего количества льда составляли старые льды. Остальное количество льдов было представлено молодыми льдами в прикромочной зоне (в Баренцевом море) или молодыми льдами в заприпайных полыньях (в западной части моря Лаптевых и в море Бофорта). Толщина припайного льда, по данным полярных станций, была меньше нормы на 10–30 см [15].

Площадь морского льда в СЛО на период максимального развития (середина мая) составила 11.4 млн km^2 , что было близко к среднему значению за последнее десятилетие и на 259 тыс. km^2 (2.5%) меньше среднего значения по длинному ряду с 1978–2021 гг. По развитию площади ледяного покрова май 2021 г. занимал 4-е место по рангу минимумов [15].

Ледовые условия в конце зимнего сезона 2021 года можно охарактеризовать как легкие по целому ряду параметров (толщина льда, развитие припая, преобладание однолетних льдов) с некоторой тенденцией к средним (по площади ледяного покрова). Особо отличительных особенностей зимнего развития ледяного покрова в 2021 г.

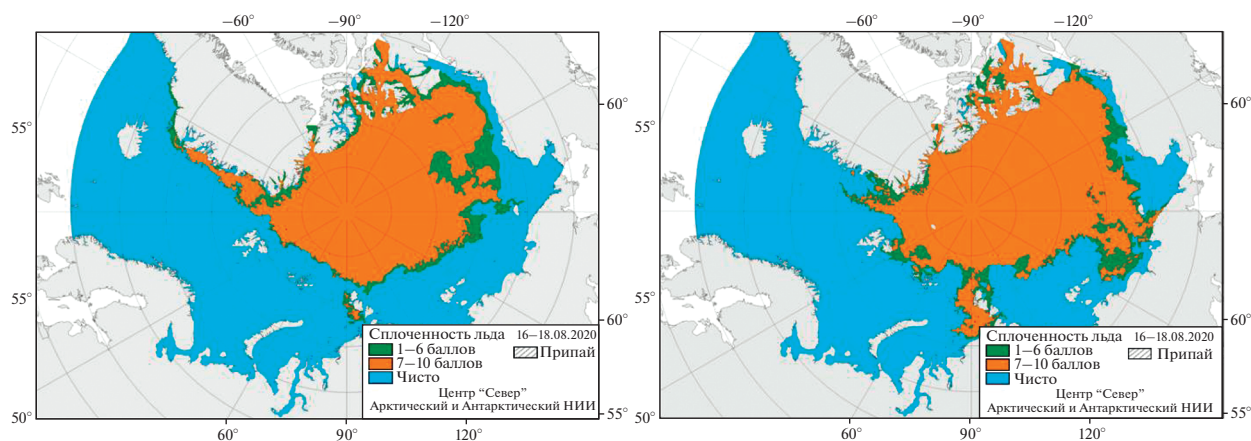


Рис. 8. Развитие ледовых условий в СЛО в середине августа в 2020 г. (слева) и в 2021 г. (справа).

в СЛО и его окраинных морях не наблюдалось. В июне и июле началось быстрое очищение акваторий морей. Обширные разряжения и зоны, свободные ото льда, сформировались в морях Карском и Лаптевых. Крупные локальные разряжения наблюдались в прибрежной части Восточно-Сибирского моря и в Чукотском море. Во всех российских арктических морях сформировались крупные отрицательные аномалии ледовитости.

Очень рано, в июле, практически полностью очистились акватории юго-западной части Карского, Лаптевых и Чукотского морей. Ледовые условия в арктических морях развивались по легкому типу. В начале летнего периода развитие процессов также особо не отличалось от предыдущих легких лет. Однако во второй половине летнего периода очищение акваторий морей замедлилось. В северо-восточной части Карского и в Восточно-Сибирском морях сохранялось большое количество дрейфующих льдов. Это было вызвано перестройкой атмосферной циркуляции и изменением общей картины дрейфа ледяного покрова, о которых упомянуто выше. Если в 2020 г. развитие ледовых условий происходило по легкому типу весь летний сезон и привело к экстремальному сокращению ледовитости, то в 2021 г. во второй половине летнего сезона произошли перестройка крупномасштабных метеорологических процессов и замедление разрушения ледяного покрова. Суммарная ледовитость российских арктических морей в 2021 г. составила 42% (в 2020 г. – 23%). В 2021 г. суммарная ледовитость морей за летний сезон приблизилась к среднемноголетнему значению для периода 2005–2021 гг. Важным следствием большой остаточной ледовитости в третьей декаде сентября в Карском и Восточно-Сибирском морях явилось более раннее ледообразование среди этих льдов.

На рис. 8 приведено распределение ледяного покрова в середине августа 2020 и 2021 гг. Наибо-

лее отличительной чертой распределения льда в 2021 г. является сохранение в середине августа двух мощных языков отроговых массивов арктических морей (массивов, связанных со льдами Арктического бассейна) – Североземельского в Карском море и Айонского – в Восточно-Сибирском. Сохранение ледяных массивов в Карском и Восточно-Сибирском морях целиком связано с изменением режима атмосферной циркуляции, приведшей к локальному изменению ледовых условий в этих морях.

Можно считать, что по целому ряду показателей (срокам начала таяния, интенсивности таяния, отрицательным аномалиям ледовитости) развитие ледовых условий в летний сезон 2021 г. проходило по легкому типу. К особенностям летнего сезона 2021 г. можно отнести очень раннее и интенсивное очищение морей Карского и Лаптевых, и сохранение остаточных льдов и раннее ледообразование в районах северо-восточной части Карского и восточной части Восточно-Сибирского морей.

В целом по СЛО площадь ледяного покрова на период максимального сокращения (середина сентября) составила около 4.7 млн км². Это значение значительно превысило среднее значение по короткому ряду наблюдений за последнее десятилетие (2011–2021 гг.), но все-таки было значительно меньше среднемноголетнего значения по длинному ряду наблюдений (1978–2021 гг.). Отрицательная аномалия составила 1.1 млн км². По развитию площади остаточного ледяного покрова на период максимального разрушения льда по рангу минимумов 2021 г. занимал 8 место.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ледовые условия российских арктических морей, по которым проходит трасса СМП, в целом определяются крупномасштабными атмосфер-

ными процессами и развитием ледяного покрова в СЛО. При этом каждому из арктических морей присущи локальные особенности формирования ледовых условий, когда в целом при легких ледовых условиях на отдельных локальных участках морей могут формироваться сложные ледовые условия, что видно на примере 2021 г.

Последний 17-летний период наблюдений показывает, что изменения ледовых условий российских арктических морей в летний сезон носят уникальный характер, который позволяет выделить его как особый экстремально легкий тип развития ледовых условий. Очищение ото льда российских арктических морей в последний период начало происходить более интенсивно и сместилось на более ранние сроки. Сроки полного очищения наблюдаются в среднем на 25–30 суток раньше. Российские арктические моря с очень большой повторяемостью (60–90%) в начале сентября полностью очищаются ото льда, чего не наблюдалось ранее в период 1946–2004 гг.

Источник финансирования: Работа выполнена в рамках НИТР Росгидромета проект 5.1 “Развитие моделей, методов и технологий мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы, океана, морского ледяного покрова, ледников и вечной мерзлоты, процессов взаимодействия льда с природными объектами и инженерными сооружениями для Арктики и технологий гидрометеорологического обеспечения потребителей” на 2020–2024 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев Г.В., Александров Е.И., Глок Н.И. и др.* Эволюция площади морского ледяного покрова Арктики в условиях современных изменений климата // Исследование Земли из космоса. 2015. № 2. С. 5–19.
2. *Алексеев Г.В., Данилов А.И., Катцов В.М. и др.* Изменения площади морских льдов Северного полушария в XX и XXI веках по данным наблюдений и моделирования // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 6. С. 723–735.
3. *Вангенгейм Г.Я.* Опыт применения синоптических методов к изучению и характеристике климата / М.: Ред.-изд. отдел Центр. Упр. Гидрометеорологической службы СССР, 1935. 112 с.
4. *Вангенгейм Г.Я.* Основы макроциркуляционного метода долгосрочных метеорологических прогнозов для Арктики // Тр. ААНИИ. 1952. Т. 34. 314 с.
5. *Виноградная Е.С., Егорова Е.С., Шевелева Т.В., Юлин А.В.* Изменчивость положения границ старых льдов в весенний период и остаточных льдов в осенний период в Северном Ледовитом океане в текущем климатическом периоде // Российская Арктика. 2020. № 2 (9). С. 41–55. <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2020-12094>
6. *Гирс А.А.* Многолетние колебания атмосферной циркуляции и долгосрочные гидрометеорологические прогнозы. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 280 с.
7. Границы морей и океанов. Изд.-во, ГУ НИО ВМФ, 1960. 40 с.
8. *Гудкович З.М., Карклин В.П., Миронов Е.У. и др.* Развитие ледовых и метеорологических условий в Арктике в период 2007–2013 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 2 (96). С. 90–103.
9. *Гудкович З.М., Карклин В.П., Фролов И.Е.* Внутривековые изменения климата, площади ледяного покрова евразийских арктических морей и их возможные причины // Метеорология и гидрология. 2005. № 6. С. 5–14.
10. *Думанская И.О.* Ледовые условия морей азиатской части России. М.: Изд.-во ИГ-СОЦИН, 2017. 640 с.
11. *Егоров А.Г.* Пространственное положение кромки льдов в августе – сентябре в восточных морях России в начале XXI в. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. №1 (66). С. 38–55. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-1-38-55>
12. *Иванов В.В., Алексеев В.А., Алексеева Т.А. и др.* Арктический ледяной покров становится сезонным? // Исследование Земли из космоса. 2013. № 4. С. 50–65.
13. Информационные материалы по мониторингу морского ледяного покрова Арктики и Южного Океана на основе данных ледового картирования и пассивного микроволнового зондирования SSMR SSM/ISSMISAMSR2. URL: <http://wdc.aari.ru/resources/d0042> (дата обращения 30.12.2021).
14. Информационный ежегодный бюллетень “Обзор гидрометеорологических процессов в Северной полярной области. 2020”, СПб.: Изд. ААНИИ, 2021. 88 с. URL: http://old.aari.ru/resources/m0035/gm_review_2020.pdf (дата обращения 30.12.2021).
15. Информационный ежеквартальный бюллетень “Обзор гидрометеорологических процессов в Северном Ледовитом океане – II квартал 2021 г.”. СПб.: Изд. ААНИИ, 2021, 64 с. URL: http://old.aari.ru/resources/m0035/gm_review_2021_2.pdf (дата обращения 30.12.2021).
16. Мировой центр данных по морскому льду. URL: <http://wdc.aari.ru> (дата обращения 11.10.2021).
17. Моря Российской Арктики в современных климатических условиях / Под. ред. И.М. Ашика. Изд.: ААНИИ, 2021. 360 с.
18. Правила плавания в акватории Северного Морского пути (редакция 2020 г.). М.: Изд. Минтранс России, 2020. 28 с.
19. *Третьяков В.Ю., Фролов С.В., Сарафанов М.И.* Изменчивость ледовых условий плавания по трассам Северного морского пути за период 1997–2018 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65. № 3. С. 328–340. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-3-328-340>
20. *Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П. и др.* Научные исследования в Арктике, Т. 2. Климатические изменения ледяного покрова морей Евразийского шельфа. СПб.: Наука, 2007. 136 с.

21. *Шерстюков Б.Г.* Региональные и сезонные закономерности изменений современного климата. ГУ “ВНИИГМИ-МЦД”, Обнинск, 2008. 247с.
22. *Юлин А.В., Вязигина Н.А., Егорова Е.С.* Межгодовая и сезонная изменчивость площади льдов в Северном Ледовитом океане по данным спутниковых наблюдений // *Российская Арктика*. 2019. № 7. С. 28–41.
<https://doi.org/10.24411/2658-4255-2019-10073>
23. *Юлин А.В., Тимофеева А.Б., Павлова Е.А. и др.* Межгодовая и сезонная изменчивость ледовитости российских арктических морей в современном климатическом периоде // *Труды ГОИН*. 2019. № 220. С. 44–60.
24. *Kwok R., Cunningham G.F., Wensnahan M. et al.* Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003–2008 // *Journal of Geophysical Research*. 2009. V. 114. № C07005.
<https://doi.org/10.1029/2009JC005312>
25. *Stroeve J.C., Serreze M.C., Holland M.M. et al.* The Arctic’s rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis // *Climatic Change*. 2011. V. 110. P. 1005–1027.

Ice Conditions of the Russian Arctic Seas in Connection with Occurring Climatic Changes and Peculiarities of Ice Cover Evolution in 2021

A. S. Makarov^{a, #}, Ye. U. Mironov^{a, ##}, V. V. Ivanov^{a, ###}, A. V. Yulin^{a, ####}

^aFSBI “Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

[#]e-mail: makarov@aari.ru

^{##}e-mail: mir@aari.ru

^{###}e-mail: v_ivanov@aari.ru

^{####}e-mail: icefor@aari.ru

An analysis of multiyear variability of ice conditions in the Russian Arctic Seas and of ice area of the Arctic Ocean was performed. Ice conditions of the Russian Arctic Seas are shown to be determined to a great extent by large-scale atmospheric processes and ice cover development in the Arctic Ocean. One observes significant changes in the character of variability of sea ice extent in the Russian Arctic Seas which allows us to identify two differing periods 1946–2004 and 2005–2021. It was revealed that during the last 17-year period there was a significant increase of recurrence of complete clearance of the area of the Russian Arctic Seas as compared with the previous periods.

Keywords: ice cover, Arctic Ocean, sea ice extent, Russian Arctic Seas, atmospheric processes, atmospheric circulation forms