

UDC 551.467: 551.58

DOI: 10.24412/2658-4255-2021-1-62-76

Citing:

A.B. Timofeeva, M.V. Sharatunova. Multiyear variability of the fast ice thickness in the Laptev Sea according to the polar station data. 2021; N° 12: p.p 62-76. (In Russ.). 10.24412/2658-4255-2021-1-62-76.

Received: 29.03.2021

Approved: 26.04.2021

Published: 28.04.2021



This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТОЛЩИНЫ ПРИПАЯ В МОРЕ ЛАПТЕВЫХ ПО ДАННЫМ ПОЛЯРНЫХ СТАНЦИЙ

А.Б. Тимофеева¹ , М.В. Шаратунова¹

¹ ГНЦРФ ААНИИ, г. Санкт-Петербург, Россия; tianna@aari.ru, mvsh@aari.ru

Аннотация: Проанализированы ряды данных по толщине припайного льда и приземной температуре воздуха сети наземных полярных станций Росгидромета в море Лаптевых. В ходе анализа выполнено сравнение значений характеристик за последний 15-летний период (2005-2020 гг.) с наблюдениями, произведенными до 2004 года, и выявлены изменения, соответствующие новым климатическим условиям. За последние 15 лет средние толщины на момент максимального нарастания (максимальная толщина льда) уменьшились на 6% в среднем по морю. Процесс нарастания льда стал происходить значительно медленнее, переход из одной возрастной градации льда в другую наблюдается на 1-2

декады позднее. Температура воздуха на рассматриваемых станциях в среднем на 3°C была выше чем в предыдущем периоде. Наибольшие изменения наблюдаются в осенние месяцы (октябре, ноябре) и в апреле. Сумма градусо-дней мороза (СГДМ), осредненная по станциям моря Лаптевых, уменьшилась на 15%; все 15 последних зимних сезонов могут быть отнесены к мягким. Выявлено, что уменьшение СГДМ хорошо согласуется с уменьшением среднесезонной (средней за ноябрь-май) толщины льда по станциям. Этот показатель представляется более информативным, чем максимальная толщина льда для оценки изменений. При осреднении по всем станциям выявлено снижение среднесезонной толщины льда на 10% за последние 15 лет.

Ключевые слова: толщина льда, припай, полярные станции, ледовые условия, море Лаптевых, сумма градусо-дней мороза

MULTIYEAR VARIABILITY OF THE FAST ICE THICKNESS IN THE LAPTEV SEA ACCORDING TO THE POLAR STATION DATA

A.B. TIMOFEEVA¹ , M.V. SHARATUNOVA¹

¹ SSCRF AARI, Saint-Petersburg, Russia; tianna@aari.ru, mvsh@aari.ru

Abstract: The series of data on the fast ice thickness and the surface air temperature at the Roshydromet land-based polar stations in the Laptev Sea are analyzed. Observations for the last 15-year period (2005-2020) are compared to observations prior to 2004, and the changes corresponding to the new climatic conditions are revealed. Over the past 15 years ice thicknesses during the period of maximum ice growth (maximum ice thickness) have decreased by 6% on average. The ice growth process has become much slower, transition between the sequential stages of ice development is observed 1-2 ten-days periods later. The surface air temperature at the considered stations was on average 3°C higher than for the previous period. The most significant changes are observed in the autumn months (October, November) and in April. The cumulative sum of the degree-day of frost averaged for the Laptev Sea stations, decreased by 15%; all 15 recent winter seasons can be classified as mild. It was revealed that the decrease of the cumulative sum of degree-day of frost is in a good agreement with the decrease of the mean-seasonal ice thickness (averaged for November-May) at the stations. This indicator seems to be more informative than the maximum ice thickness for estimation of the changes. Averaging over all stations revealed a 10% decrease of the mean-seasonal ice thickness during the past 15 years.

Keywords: ice thickness, fast ice, polar stations, ice conditions, Laptev Sea, sum of frost degree-days

Введение

Процесс потепления в Арктике устойчиво развивается. Одним из проявлений этого процесса является быстрое сокращение площади арктического морского льда во все сезоны года [1-3]. Наиболее сильное сокращение площади ледяного покрова наблюдается в сентябре, в конце сезона таяния [4-6]. Потепление существенно сказывается на всем режиме развития ледяного покрова – изменяется начало сроков ледообразования [7], таяния и других режимных характеристик в российских арктических морях [8]. В ряде работ рассматриваются климатические колебания в Арктике с выделяющимися приблизительно 30-35-летними периодами «относительного похолодания и потепления» [9, 10]. Однако ряд авторов выделяет существенное усиление процессов потепления и уменьшения ледовитости с 2005 г. [11-13], отмечая, что, помимо изменения атмосферных процессов, термохалинная структура вод и циркуляции Северного Ледовитого океана (СЛО) перешли в новую фазу климатических изменений [15].

Толщина морского льда является важной характеристикой, а ее колебания – чувствительным индикатором изменения климата. Для оценки толщин льда используются как непосредственно контактные, так и разнообразные дистанционные измерения, в том числе выполненные с помощью гидролокаторов на подводных лодках [14, 15], электро-магнитное зондирование специальным оборудованием [16, 17] и альтиметрические наблюдения искусственных спутников Земли (ИСЗ). Большинство исследований толщины морского льда базируется на численном моделировании и информации полученной с помощью спутниковой радиолокационной альтиметрии [18-21]. Результаты всех исследований согласуются с утверждением, что морской лед в Арктике становится тоньше. Об этом же свидетельствуют косвенные оценки изменения толщины льда по изменениям в возрастном составе ледяного покрова [22]. Однако оценки на основе спутникового дистанционного зондирования и по данным численного моделирования характеризуются значи-

тельной неопределенностью и требуют валидации с контактными измерениями. Подобные сравнения выполнялись, например, по результатам ледовых исследований в экспедиции «Трансарктика» [23]. Но сравнение и верификация с контактными измерениями межгодовых изменений затруднительны из-за их эпизодичности и локальности.

В связи с этим измерения толщины на полярных станциях представляют существенный интерес, поскольку имеют длинный ряд наблюдений, собранный в одних режимных условиях из года в год. Это позволяет оценить многолетние изменения толщины льда, основываясь на достаточно точных контактных измерениях.

Материалы и методы

В работе использовались данные по приземной температуре воздуха и толщине припайного льда, полученные на ряде наземных полярных станций сети Росгидромета.

Регулярные измерения толщины льда на полярных станциях начались в середине 30-х гг. XX века, часть которых была закрыта в течение 90-х гг. Для исследования были отобраны полярные станции моря Лаптевых (рис. 1) с примерно одинаковой длительностью наблюдений: о. Котельный, б. Тикси, м. Челюскин, пр. Санникова, Кигилях, (станцию м. Челюскин обычно относят к Карскому морю, однако, поскольку в западной части моря Лаптевых нет другой действующей полярной станции с длинным рядом наблюдений, она включена в настоящее исследование).

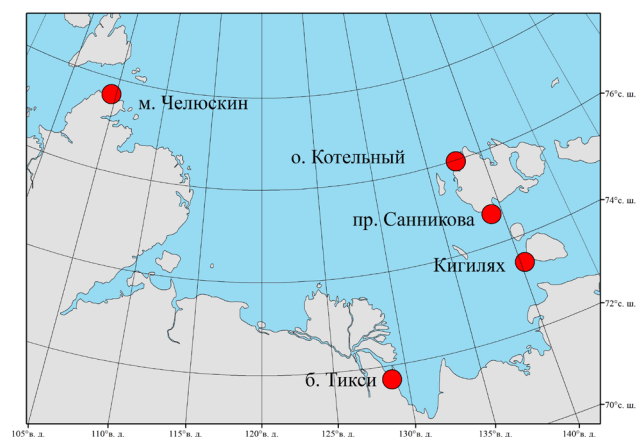


Рисунок 1 – Схема расположения полярных станций.

Все отобранные станции являются береговыми и производят измерения на припае, толщина которого обычно больше толщины дрейфующего льда [24, 25]. Припай формируется в зимний период и своего максимального развития достигает к марту-апрелю. Наиболее обширную площадь припай занимает в восточной мелководной части моря [26]. В западной части припай довольно узок, формируется вдоль побережья о-вов Северной Земли. Границы типового распространения припая в апреле представлены на рисунке 2. В летний период в подавляющем большинстве случаев припай полностью разрушается. Отмечены несколько случаев частичного сохранения припая после сезона таяния в годы с наиболее суровыми метеорологическими и ледовыми условиями.

Данные по толщине льда представляют собой результаты измерений в соответствии с Наставлением гидромете-

орологическим станциям и постам [27]. Измерения толщины производятся в постоянной точке (ПТ). Выбор ПТ осуществляется заблаговременно, с первых дней нового осеннего ледообразования. Припай в ПТ должен быть ровным, равномерно заснеженным и в целом типичным для объекта. ПТ должна находиться неподалеку от берега, но на глубине не менее 2 метров. Выход на припайный морской лед для измерений разрешается по достижении им толщины 12 сантиметров. По соображениям безопасности, вначале ПТ может быть временно организована вблизи берега на дополнительном участке. Затем, когда выход на припай становится достаточно безопасным, ПТ переносится на более удаленный от берега основной участок.

Бурение льда выполняется специальным буром, модификации которого изменялись и совершенствовались с течением времени. Современным техническим средством для бурения льда являются механические буры с компактными бензиновыми двигателями или электрические буры.

Первая пробуренная лунка в выбранном месте ПТ маркируется вмораживаемой вехой, в радиусе 10-15 метров от которой выполняются все последующие измерения. Круг, очерченный этим радиусом, собственно и является ПТ. Каждая вновь пробуренная лунка после измерения засыпается ледяной крошкой и снегом, но так, чтобы она оставалась приметной во избежание попадания в старую лунку при дальнейших измерениях. В состав наблюдений в ПТ входит измерение толщины и превышения над поверхностью воды (или глубины погружения) припайного льда, не менее чем в двух пробуриваемых лунках, а также высоты и плотности снежного покрова.

Измерение толщины льда осуществляется с использованием ледомерной рейки. Для определения среднего значения толщины припайного льда в ПТ можно ограничиться двумя лунками, если толщины в них различаются менее чем на 5 см. В противном случае бурится третья, а при необходимости и четвертая лунки.

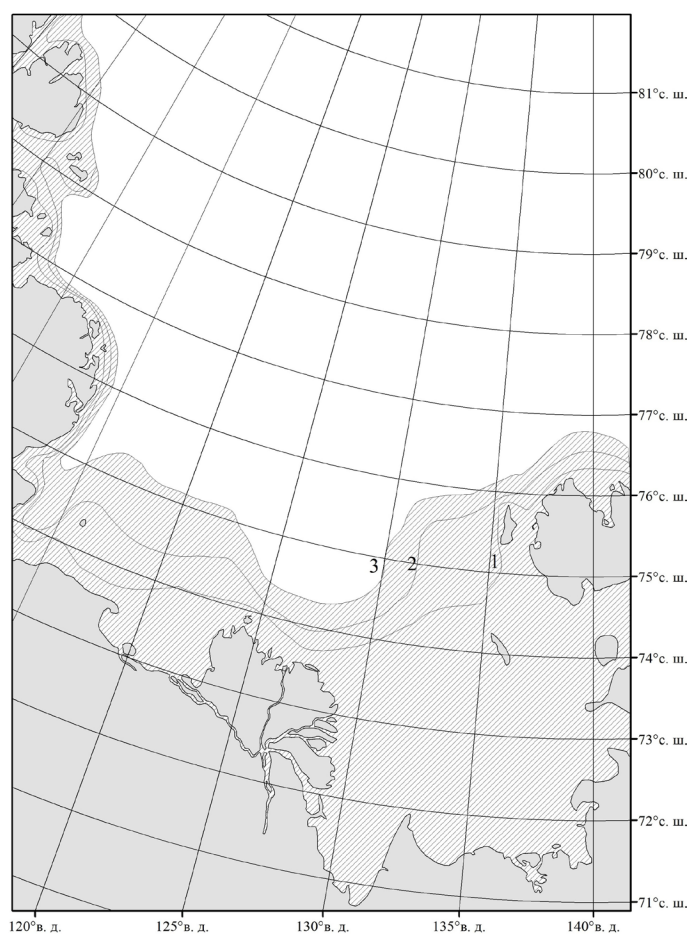


Рисунок 2 – Характерное распространение припая в море Лаптевых в апреле (1 - минимальное положение; 2 - среднее положение; 3 - максимальное положение) [26].

Резко отличающиеся значения толщины льда обязательно фиксируются, но в расчет не принимаются. Высоту снежного покрова на льду измеряют специальными снегомерными рейками, а плотность снега — весовым снегомером.

Дискретность проведения измерений ежелекадная. Если по каким-либо причинам не удалось выполнить измерения в установленный день, они проводятся в ближайшие сутки с благоприятными условиями для работы.

Архив ААНИИ содержит результаты измерений толщины льда за каждую декаду месяца, преимущественно с октября (иногда с сентября) по июль. В рядах наблюдений есть пропуски информации, причиной которых могло являться отсутствие наблюдений в отдельные годы, проблемы с поступлением информации по каналам связи, наличие человеческого фактора.

В настоящем исследовании данные по толщине за сентябрь и октябрь во внимание не принимались по причине большого количества пропусков по годам, особенно в первые декады (из-за невозможности проводить измерения до становления припая достаточной толщины). Для уменьшения ошибок в расчетах значения наблюдений, вызывающие сомнения (например, правдоподобность экстремальных значений), проверялись сравнением с информацией соседних станций (с ледовыми и метеоусловиями), и иногда при несоответствии исключались.

Также исключались случаи, не соответствующие задачам исследования, когда наблюдались нарушения в наблюдении за сезонным ходом нарастания толщины льда. Резкие скачки толщины в сезонном ходе, происходящие за одну декаду (т.е. значительно превышающие средние значения прироста толщины за одну декаду в эти сроки), трактовались как «подсов» льда в результате динамических процессов и торошения. Все такие случаи из расчетов исключались, как и результаты наблюдений после разрушения припая в ПТ и последующей смены площадки (обычно этот факт фиксируется в примечаниях), как нехарактерные.

В отдельные годы на станциях, например, на о. Котельный в сезон 1962-1963 гг., припай не разрушился за лето, и осенние измерения толщины проводились на остаточном льду. Такие значения также были исключены из расчетов как не соответствующие задаче оценки процесса нарастания толщины льда. Данные по температуре воздуха, полученные на тех же станциях для исследования, использовались осредненные за месяц.

Для анализа были взяты ряды данных по толщине с ноября по июнь по 2020 г. включительно, начиная с конца 30-х годов, с начала регулярных измерений. Год начала измерений может различаться по станциям, что отмечено в таблице 1.

Таблица 1
Общая информация о рядах наблюдений на полярных станциях моря Лаптевых.

Пункт наблюдений	Характеристика	Год начала	Число лет набл.	Пропуски данных, %
м. Челюскин	Температура (среднемесячная)	1933	88	0
	Толщина льда (ежелекадная)	1937/1938	83	7
Тикси	Температура (среднемесячная)	1936	85	0
	Толщина льда (ежелекадная)	1940/1941	81	3
о. Котельный	Температура (среднемесячная)	1936	85	0
	Толщина льда (ежелекадная)	1939/1940	81	2
пр.Санникова	Температура (среднемесячная)	1942	79	1
	Толщина льда (ежелекадная)	1942/1943	78	4
Кигилях	Температура (среднемесячная)	1939	82	1
	Толщина льда (ежелекадная)	1939/1940	81	2

Результаты

Изменения приповерхностной температуры воздуха над покрытой льдами в зимний период акваторией Северного Ледовитого Океана (СЛО) характеризуются повышением зимних температур после 1998 г. и ростом летних температур после 1996 г. [10, 11]. Потепление привело к сокращению площади арктического

морского ледяного покрова в конце летнего периода, завершившееся самым глубоким ее минимумом в сентябре 2012 г. Некоторые авторы [11-13] выделяют 2005 год как начало нового состояния климатической системы, с существенными изменениями как в океанических процессах, так и в атмосферных, в том числе резкое увеличение положительной аномалии температуры воздуха (рисунок 3) и стремительного сокращения ледяного покрова в последние 15 лет.

Другие характеристики ледяного покрова, такие как толщина, сплоченность, положение границ многолетних льдов и др., были также подвержены климатическим изменениям. По этой причине в данной работе было решено сравнить данные по толщине льда и температуре, полученные на полярных станциях моря Лаптевых за последний 15-летний период (2005-2020 гг.) с наблюдениями, произведенными до 2004 года.

В осенний период ледообразование происходит на чистой воде, акватория свободна ото льда, поскольку в подавляющем большинстве случаев припай полностью разрушается за летний период [24]. Формирование припая начинается при толщине молодого льда 6-8 см. Толщина льда постепенно нарастает, достигая максимальных значений в апреле-мае. Максимальная толщина льда, за-

фиксированная в каждом годовом цикле, используется для дальнейшего анализа. На рисунке 4 представлена межгодовая изменчивость максимальной толщины льда по рассматриваемым станциям.

Как видно на графиках, межгодовая изменчивость толщины льда может значительно варьировать от года к году. Межгодовой ход на станции м. Челюскин несколько отличается от других станций, поскольку в нем более четко прослеживаются долгопериодные колебания 30-35 лет, со значительным увеличением толщины льда в 60-80е годы. Это вполне соответствует выявленным ранее климатическим колебаниям [9, 10] и особенностям развития гидрометеорологических процессов в этой части моря, в том числе связь с режимными особенностями Карского моря [24, 25, 29].

Основные статистические характеристики по максимальной толщине льда за весь ряд наблюдений, а также отдельно за последний 15-летний период приведены в таблице 2. Средние толщины на момент максимального нарастания и по станциям в восточной части моря колеблются в пределах 209-221 см. Для станции м. Челюскин средняя толщина несколько ниже, и составляет 192 см. На всех станциях толщина льда имеет значительные амплитуды колебаний (55-92 см).

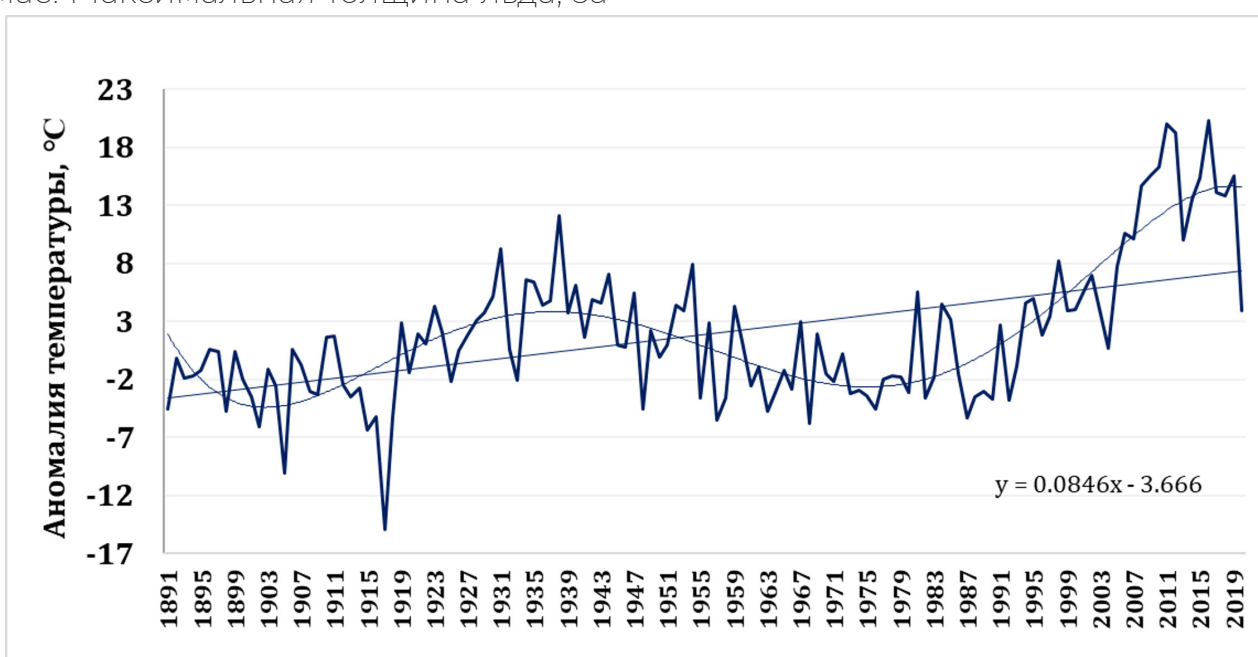


Рисунок 3 – Межгодовая изменчивость аномалии осредненной температуры воздуха в широтной зоне 70-85° с.ш. (аппроксимация аномалий выполнена полиномом 6-й степени.)

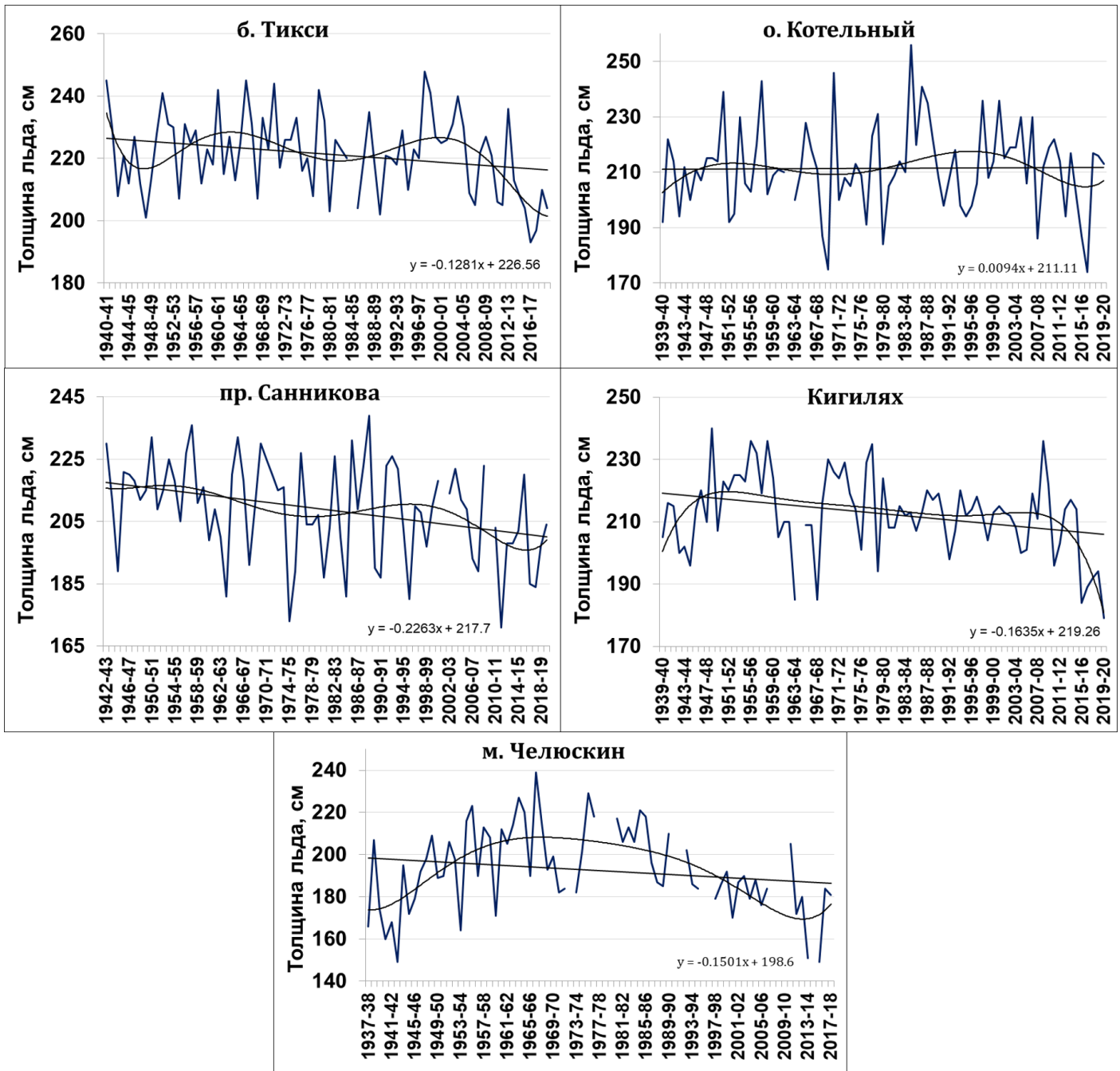


Рисунок 4 – Межгодовая изменчивость максимальной толщины льда по измерениям на полярных станциях (аппроксимация выполнена полиномом 6-й степени).

Изменения толщины льда имеет выраженный отрицательный тренд (кроме станции о. Котельный). Все абсолютные максимумы толщины льда на каждой из рассматриваемых станций были зафиксированы в период до 2005 г. Наибольшая толщина была отмечена на станции о. Котельный зимой 1984/1985 гг. (256 см). Все абсолютные минимумы толщины

льда зафиксированы в последний 15-летний период (таблица 2). Средние толщины на момент максимального нарастания за последние 15 лет уменьшились на всех станциях на 1-11%. Наименьшие изменения средней толщины выявлены на станции о. Котельный (-3 см), наибольшие на станции м. Челюскин (-21 см).

Таблица 2

Статистические характеристики толщины льда на полярных станциях моря Лаптевых.

	м.Челюскин (с 1937/1938)	б.Тикси (с 1940/1941)	о. Котельный (с 1939/1940)	пр.Санникова (с 1942/1943)	Кигилях (с 1939/1940)
Весь ряд наблюдений					
Среднее, см	192	221	212	209	213
Максимум, см	239	248	256	239	240
Минимум, см	147	193	174	171	179
Размах, см	92	55	82	68	61
СКО	21	12	16	16	13
Период по сезон 2004/2005					
Среднее, см	196	224	212	211	214
Максимум, см	239	248	256	239	240
Минимум, см	149	201	174	173	185
Размах, см	90	47	82	66	55
СКО	19	11	16	15	15
Период с сезона 2005/2006 по сезон 2019/2020					
Среднее, см	175	211	209	198	204
Максимум, см	205	236	230	223	236
Минимум, см	147	193	174	171	179
Размах, см	58	43	56	52	57
СКО	17	11	15	13	11
Изменение средний толщины за последние 15 лет					
Разница, см	-21	-13	-3	-13	-10

На рисунке 5 представлены графики нарастания толщины льда (подекадно) и годовой ход среднемесячной температуры воздуха: с года начала наблюдений по станциям до 2004 года и за последние 15 лет. Очевидно, что в последние 15 лет нарастание толщины происходит значительно медленнее на всех станциях. Так, достижение толщины, например, 100 см, происходит на 1-2 декады позднее, чем в предыдущем периоде измерений (до 2004 г.).

Только на станции о. Котельный в последние 15 лет к концу апреля-мая толщина льда приближается к среднепогодным значениям. Разница толщины

льда за каждую декаду между исследуемыми временными периодами представлена в таблице 3. В целом, стоит отметить, что разброс изменений в рамках сезонного нарастания льда может быть довольно ровным по всем декадам, как на станции б. Тикси (7-13 см), или иметь большую амплитуду значений, как на станции о. Котельный (3-32 см). При этом более значительные изменения на большинстве станций наблюдаются в начале периода нарастания и уменьшаются, начиная с января. Наибольшие изменения в течение всего сезона показывает станция м. Челюскин.

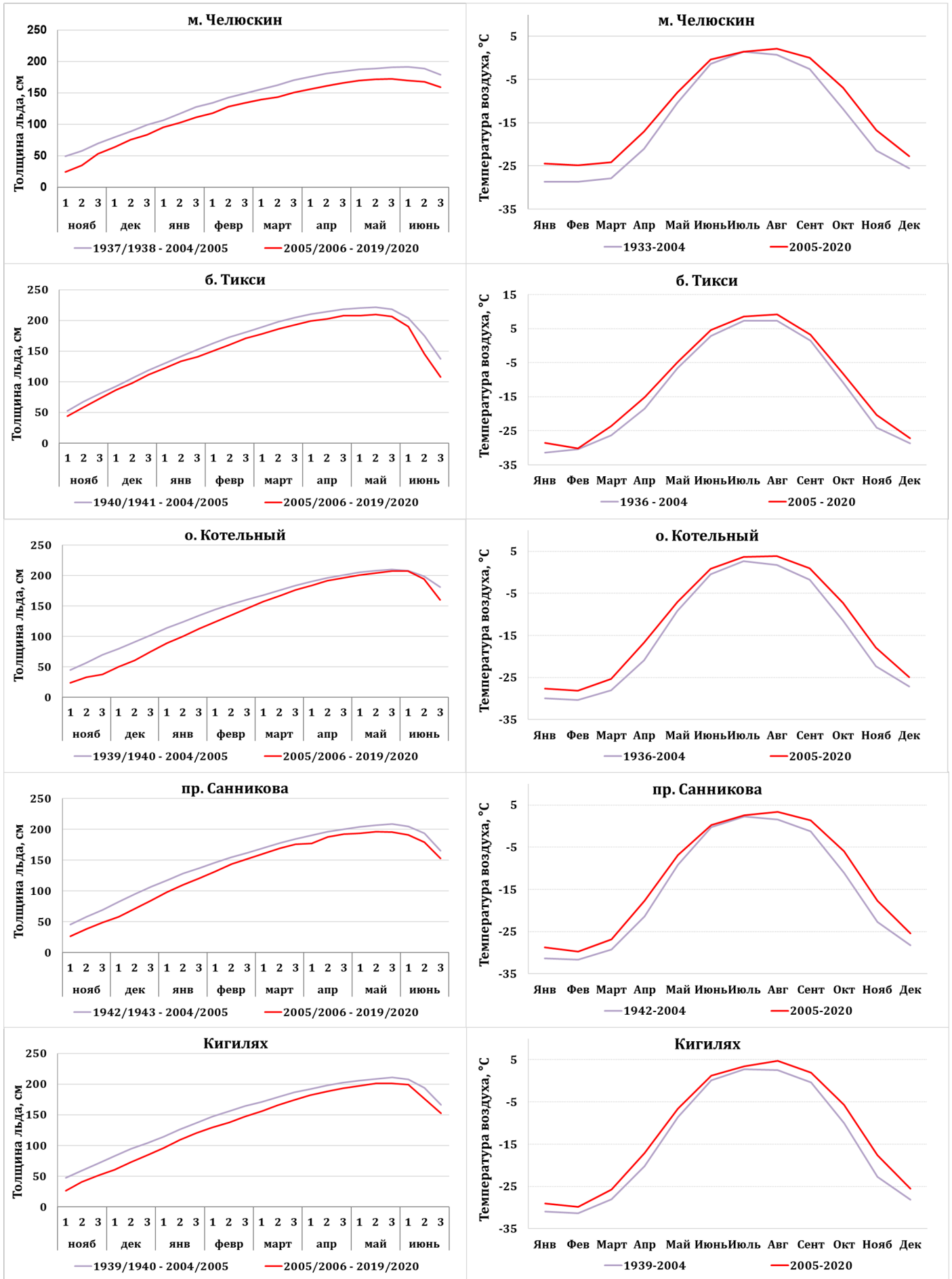


Рисунок 5 – Подекадное нарастание толщины льда (слева) и среднемесячная температура воздуха (справа), осредненные за периоды: начало наблюдений - 2004 г. и 2005 – 2020 гг.

Таблица 3

Ежедекадные изменения средней толщины льда за последние 15 лет по сравнению с предыдущим периодом наблюдений (см).

месяц	ноябрь			декабрь			январь			февраль			март			апрель			май			Среднее за сезон
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
м.Челюскин	-25	-23	-17	-16	-13	-16	-11	-15	-16	-17	-15	-15	-16	-19	-19	-20	-20	-19	-18	-17	-18	-17
б.Тикси	-9	-9	-8	-6	-8	-7	-7	-7	-12	-13	-13	-10	-11	-12	-12	-11	-12	-10	-13	-12	-12	-10
о.Котельный	-21	-23	-32	-29	-30	-27	-25	-23	-22	-21	-18	-14	-11	-9	-7	-7	-4	-4	-4	-4	-3	-16
пр.Санникова	-19	-20	-21	-24	-24	-23	-19	-18	-16	-14	-11	-10	-10	-8	-9	-13	-9	-8	-10	-10	-13	-15
Кигилях	-21	-18	-20	-23	-22	-20	-18	-17	-17	-17	-19	-17	-15	-13	-12	-10	-9	-9	-9	-8	-10	-15
Среднее	-19	-19	-20	-20	-19	-19	-16	-16	-17	-16	-15	-13	-13	-12	-12	-12	-11	-10	-11	-10	-11	-15

На графиках сезонного хода температуры воздуха (рисунок 5) заметно, что в последние 15 лет среднемесячная температура в течение всего годового цикла была на 0,1-5,1°C выше средней за предыдущий период до 2004 г. Значения разницы среднемесячной температуры между исследуемыми периодами приведены в таблице 4. Наибольшие изменения тем-

пературы на 3,7-5,1°C наблюдаются преимущественно в осенние месяцы (октябре, ноябре), а также в апреле. Наименьшие - с увеличением температуры на 0,1-2,4°C, с мая по август. Для осенне-зимнего сезона характерно повышение температуры на 1,6-3,4°C, кроме станции м. Челюскин, где с января по апрель повышение среднемесячной температуры составляет 3,7-4,2°C.

Таблица 4

Изменения среднемесячной температуры воздуха за последние 15 лет по сравнению с предыдущим периодом наблюдений (°C).

	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	Среднее за год
м.Челюскин	4.2	3.8	3.7	4.1	2.4	1.0	0.1	1.3	2.6	5.0	4.7	2.8	3.0
б.Тикси	2.9	0.1	2.7	3.4	1.7	1.7	1.2	1.9	1.6	2.6	3.7	1.4	2.9
о.Котельный	2.4	-2.2	2.6	4.1	2.1	1.3	1.0	2.1	2.7	4.2	4.4	2.3	2.6
пр.Санникова	2.6	1.9	2.4	3.7	2.3	0.5	0.3	1.8	2.7	5.0	5.0	2.8	2.6
Кигилях	2.0	1.5	2.3	3.1	2.1	1.1	0.8	2.2	2.4	4.4	5.1	2.6	2.0
Среднее	2.8	1.9	2.7	3.7	2.1	1.1	0.7	1.9	2.4	4.2	4.6	2.4	2.6

Для оценки суровости зимнего периода часто используется показатель СГДМ. В работе [29] были определены критерии и осуществлен расчет интервалов критериев суровости зим (мягкой, умеренной, суровой) по СГДМ для станций м. Челюскин, о. Котельный и б. Тикси до 2015 г. К умеренным отнесены зимы с СГДМ в интервале от значения, соответствующего «среднее плюс 20 % амплитуды» до значения «сред-

нее минус 20 % амплитуды», из расчета исключены самая холодная и самая теплая зимы, как наименее характерные.

Нами был повторен расчет по описанной в пособии методике с продлением рядов наблюдений за температурой до 2020 г. и выделением новых интервалов СГДМ для определения типов зим по суровости. В таблице 5 представлены результаты расчетов.

Таблица 5
Средние значения СГДМ и повторяемость суровых (С), умеренных (У) и мягких (М) зим за исследуемые периоды времени.

ГМС	СГДМ, °С		Повторяемость типов зим, %					
	До 2004г.	2005-2020гг.	До 2004г.			2005-2020гг.		
	Сред.	Сред.	С	У	М	С	У	М
Челюскин, 83г., (с 1937/1938)	5445	4436	19	55	7	0	20	80
Тикси, 81г., (с 1940/1941)	5342	4820	20	53	14	0	47	53
о. Котельный, 81г., (с 1939/1940)	5509	4732	21	60	4	0	20	80
Санникова, 78л., (с 1942/1943)	5596	4812	21	55	5	0	7	93
Кигилях 81г., (с 1939/1940)	5377	4510	21	57	4	0	0	100
Среднее по морю, 78л., (с 1942/1943)	5468	4662	22	56	3	0	0	100

Анализ данных показывает, что за последние 15 лет по сравнению с предыдущим периодом, СГДМ, осредненная по всем станциям моря Лаптевых, уменьшилась на 806°C , что составляет 15%. При этом наибольшие изменения СГДМ наблюдаются на станции м. Челюскин (-19%), а наименьшие на станции б. Тикси (-10%). За последнее 15 лет ни на одной из станций не наблюдалось зимы, отвечающей критериям суровой. На долю умеренных зим приходится от 7% (пр. Санникова) до

47% (б. Тикси). Количество мягких зим выросло на 39-96% по станциям и составило 53% (б. Тикси) - 100% (Кигилях). Расчеты показывают, что при осреднении значений по рассматриваемым станциям, все 15 последних зимних сезонов могут быть отнесены к мягким. На рисунке 6 представлены изменения СГДМ, а также средней за сезон (с ноября по май) толщины льда и толщины льда на момент максимального нарастания за последний 15-летний период.

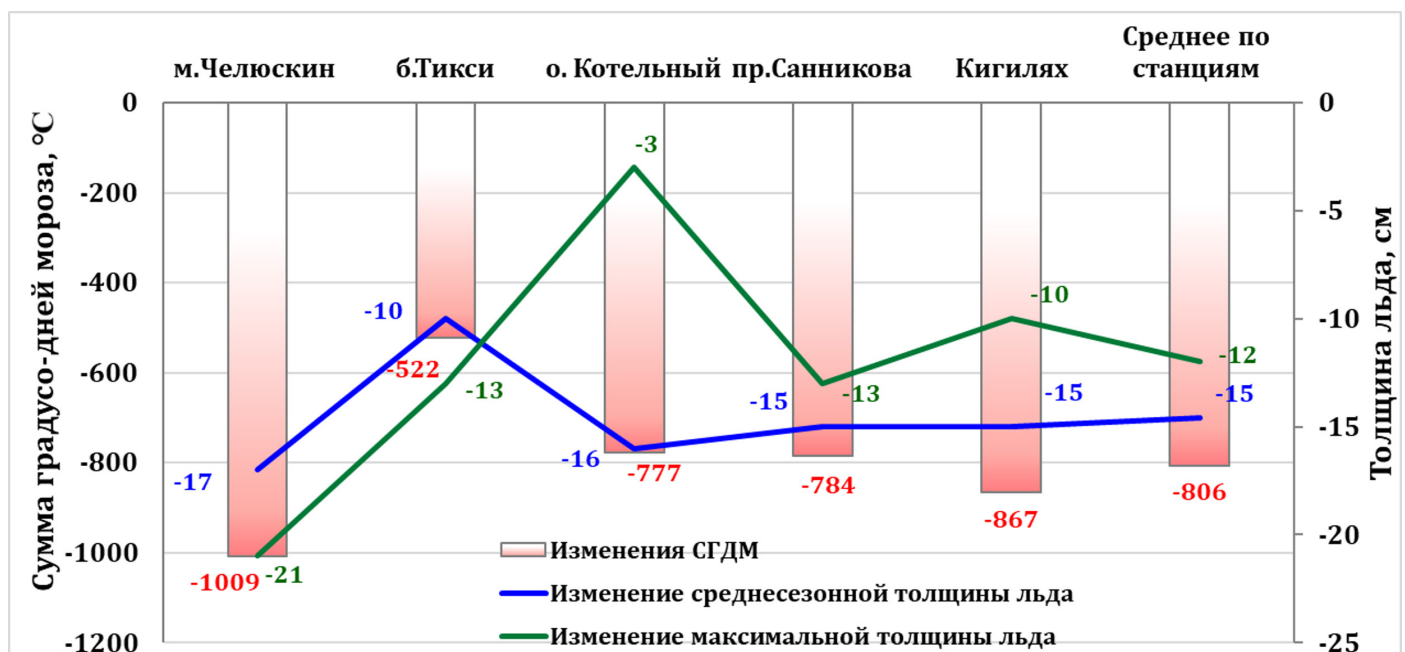


Рисунок 6 – Изменения СГДМ, средней за сезон и на момент максимального нарастания толщины льда по станциям моря Лаптевых за последний 15-летний период.

Как видно на рисунке 6, уменьшение СГДМ хорошо согласуется с уменьшением среднесезонной толщины льда по станциям. Наибольшие изменения обоих характеристик наблюдаются на станции м. Челюскин, наименьшие на станции б. Тикси. При этом согласованность СГДМ с максимальной толщиной льда значительно меньше. Особенно резко выделяются значения станции о. Котельный, где при значительном уменьшении СГДМ и среднесезонной толщины льда, максимальная толщина практически не изменилась за последнее аномально теплое 15-летие.

Связь СГДМ с толщиной льда изучалась многими авторами [30, 31]. Проведенный корреляционный анализ (результаты представлены в таблице 6) длинных 78-83-летних рядов показывает более тесную связь СГДМ со среднесезонной толщиной льда. Эта связь значительно выше, чем связь с максимальной толщиной, на большинстве станций. При осреднении значений по всему морю (по всем станциям) коэффициент корреляции составляет 0,6-0,7 и является значимым для 78-летнего ряда наблюдений.

На рисунке 7 приведен осредненный по всем исследуемым станциям межгодовой ход повторяемости суровых, умеренных и мягких зим с соответствующими значениями СГДМ и график многолетней изменчивости среднесезонной толщины

Таблица 6
Коэффициенты корреляции СГДМ с среднесезонной и максимальной толщиной льда по станциям моря Лаптевых.

Станция	СГДМ/Среднесезонная толщина льда	СГДМ/Максимальная толщина льда
м.Челюскин	0,6	0,4
б.Тикси	0,5	0,6
о.Котельный	0,4	0,3
пр.Санникова	0,5	0,3
Кигилях	0,4	0,2
Среднее по морю	0,7	0,6

льда (аппроксимация полиномом 6 степени). В межгодовом ходе хорошо выделяется период 1960х-1980х с высокой повторяемостью суровых зим и большими толщинами льда. Период потепления Арктики 1930х-1940х [9, 10, 32] также хорошо распознается по повышению повторяемости мягких и умеренных зим, а также пониженной толщиной льда до 1950-х годов. Последний 15-летний период резко выделяется высокой повторяемостью мягких зим и значительным снижением среднесезонной толщины льда.

Обсуждение результатов и заключение

Изучение толщины льда на полярных станциях не может в полной мере характеризовать динамику толщины ледяного покрова во всей Арктике, поскольку

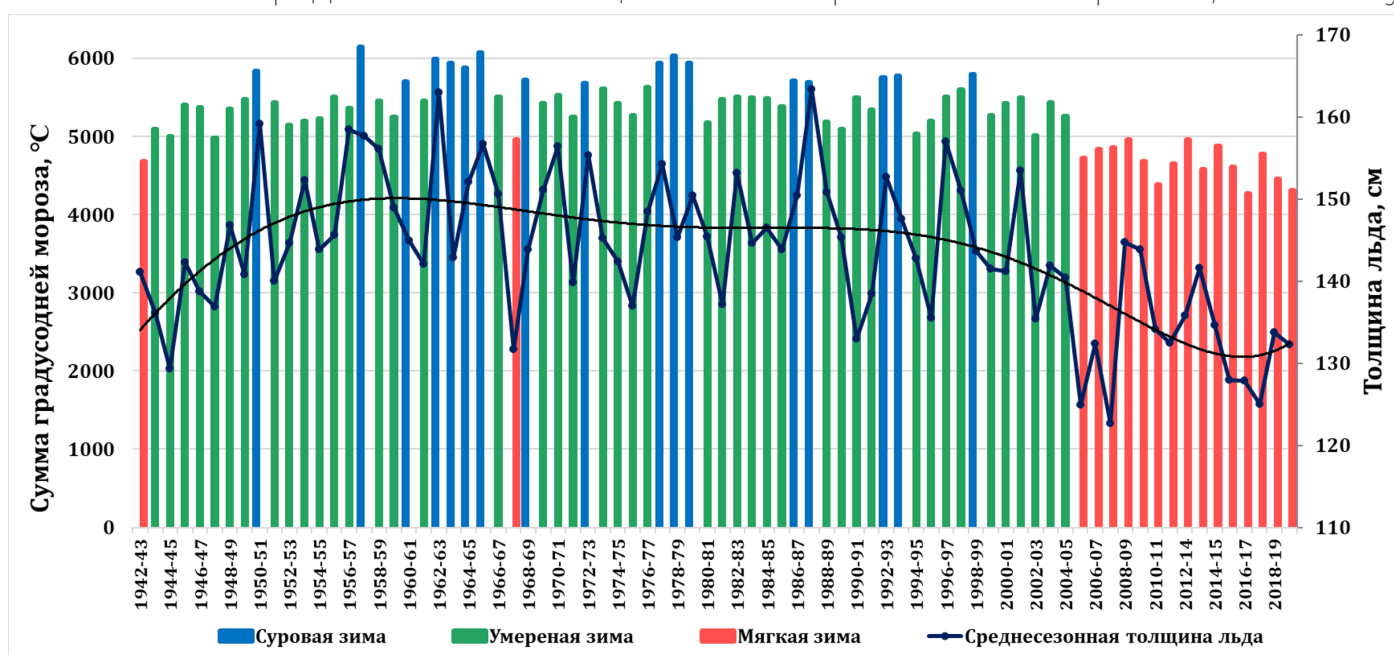


Рисунок 7 – Межгодовая изменчивость осредненной по морю СГДМ и среднесезонной толщины льда.

измерения проводятся на припайном льду, а не на дрейфующем. Тем не менее, длинный ряд наблюдений, достаточно высокая точность контактных измерений дает возможность с большой достоверностью оценить изменения такой характеристики, как толщина льда, в современных климатических условиях.

Чаще всего в различных исследованиях для оценки климатических изменений используется такая характеристика, как максимальная толщина льда, т.е. максимум, который был достигнут в ходе одного зимнего сезона. Межгодовая изменчивость максимальной толщины льда по станциям характеризуется значительным размахом колебаний (55-92 см) и, кроме станции о. Котельный, выраженным отрицательным трендом. Средние толщины на момент максимального нарастания колеблются в пределах 209-221 см. в восточной части моря, 192 см на м. Челюскин в западной части.

Все абсолютные максимумы толщины льда по станциям за полный ряд наблюдений были зафиксированы в период до 2005 г., в то время как абсолютные минимумы толщины льда зафиксированы в последние 15 лет. Средние толщины на момент максимального нарастания (максимальная толщина льда) за последние 15 лет уменьшились на всех станциях на 1-11%. (6% в среднем по морю) по сравнению с предыдущим периодом. Наименьшие изменения выявлены на станции о. Котельный (-3 см), наибольшие на станции м. Челюскин (-21 см).

В ходе анализа подекадных значений толщины льда выявлено, что процесс нарастания в последние 15 лет происходит значительно медленнее на всех станциях. Сроки перехода в следующую возрастную градацию сместились на 1-2 декады позднее, чем в предыдущем периоде измерений. Только на станции о. Котельный к концу мая толщина льда приближается к среднемуголетним значениям.

Температура воздуха на рассматриваемых станциях в последние 15 лет в среднем на 2,6°C была выше, чем в предыдущем периоде. Наибольшие изменения, 3,7-5,1°C, наблюдаются в осенние месяцы

(октябре, ноябре), а также в апреле. Для зимнего сезона характерно повышение температуры на 1,6-3,4°C, а для летнего – на 0,1-2,4°C. Значительное повышение температуры воздуха осенью способствует более позднему началу ледообразования, весной – замедлению нарастания и более раннему началу таяния льда.

Сумма градусо-дней мороза (СГДМ) хорошо характеризует изменение суровости зимнего периода. За последние 15 лет по сравнению с предыдущим периодом, СГДМ, осредненная по всем станциям моря Лаптевых, уменьшилась на 15%. Расчеты показывают, что ни на одной из станций не наблюдалось зимы, отвечающей критериям суровой, а при осреднении значений по станциям, все 15 последних зимних сезонов могут быть отнесены к мягким.

Установлено, что уменьшение СГДМ хорошо согласуется с уменьшением среднесезонной (средней за ноябрь-май) толщины льда по станциям, гораздо лучше, чем с максимальной толщиной льда. Проведенный корреляционный анализ длинных 78-83-летних рядов показывает их более тесную связь на большинстве станций и более высокий коэффициент корреляции (0,7).

В различных исследованиях часто используют именно максимальную толщину льда, в том числе для оценки климатических изменений. Однако максимальная толщина льда может не отражать наблюдаемых климатических изменений в полной мере, как это выявлено, например, на станции о. Котельный, где максимальная толщина льда почти не изменилась за последние 15 лет при значительном уменьшении СГДМ. Максимальное значение в годовом цикле обычно фиксируется в апреле или мае, т.е. в конце периода нарастания. Однако дата, когда был достигнут максимум и как быстро происходило нарастание льда обычно не учитывается, и в анализе участвует только максимальное значение. Тем не менее, с уменьшением холодного периода, снижением показателя СГДМ, сокращением активного периода нарастания льда, должна уменьшаться и его толщина, что лучше отражает

такая характеристика, как среднесезонная толщина льда. Этот показатель представляется более информативным, поскольку он компилирует внутри себя и максимальные значения, и более медленное нарастание льда, а также лучше коррелирует с СГДМ. В примере с о. Котельный это также хорошо заметно, поскольку среднесезонная толщина льда уменьшается в соответствии с уменьшением СГДМ, в отличие от максимальной. По результатам анализа рядов данных, осредненных по

всем станциям выявлено снижение среднесезонной толщины льда на 10% за последние 15 лет.

В заключение можно отметить, что последний 15-летний период (2005-2020 гг.) выделяется наиболее мягкими условиями за всю историю наблюдений на полярных станциях моря Лаптевых. Это подтверждает другие исследования, которые выделяют именно этот период в качестве нового состояния климатической системы.

Список литературы:

- Comiso, J.J. Large decadal decline of the arctic multiyear ice cover. *J. Clim.* 2012, 25, 1176–1193. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00113.1>
- Petty, A. A., Stroeve, J. C., Holland, P. R., Boisvert, L. N., Bliss, A. C., Kimura, N., and Meier, W. N.: the Arctic sea ice cover 2016: a year of record-low highs and higher-than-expected lows, *The Cryosphere*, 12(2), 433–453, <http://doi.org/10.5194/tc-12-433-2018>, 2018.
- Stroeve, J. C., Serreze, M. C., Holland, M. M., Kay, J. E., Malanik, J., and Barrett, A. P.: The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis, *Climate Change*, 110, 1005–1027, <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0101-1>, 2012.
- Serreze, M. C., Stroeve, J., Barrett, A. P., and Boisvert, L. N.: Summer atmospheric circulation anomalies over the Arctic Ocean and their influences on September sea ice extent: A cautionary tale, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 121, 11463–11485, <https://doi.org/10.1002/2016JD025161>, 2016.
- Stroeve, J. C., Markus, T., Boisvert, L., Miller, J., and Barrett, A.: Changes in Arctic melt season and implications for sea ice loss. *Geophys. Res. Lett.*, 41(4), 1216–1225, <http://doi.org/10.1002/2013GL058951>, 2014.
- Serreze, M. C., Holland, M. M., and Stroeve, J.: Perspectives on the Arctic's Shrinking Sea-Ice Cover, *Science*, 315, 1533–1536, <https://doi.org/10.1126/science.1139426>, 2007.
- Егоров А.Г., Павлова Е.А. Изменение сроков устойчивого ледообразования в восточных арктических морях России в начале XXI в. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2019;65(4):389–404. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-4-389-404>
- Юлин А.В., Тимофеева А.Б., Павлова Е.А., Шаратунова М.В., Хотченков С.В. Межгодовая и сезонная изменчивость ледовитости российских арктических море в современном климатическом периоде, *Труды ГОИН* № 220. стр. 44–60. М. 2019 ISSN: 0371-7119
- Frolov I., Gudkovich Z., Karklin V., Kovalev E. Smolyanitsky V. *Climate Change in Eurasian Arctic Shelf Seas. Centennial Ice Cover Observations*. Praxis Publishing Ltd. UK, Chichester. 2009. 164 p.
- Иванов В.В., Алексеенков Г.А. Коржииков А. Я. О совершенствовании макроциркуляционного метода долгосрочного метеорологического прогноза в Карском море//*Гидрометеорологические исследования и прогнозы (Труды Гидрометцентра России)*. – 2018. №4 (370). С. 105–121. ISSN 2618-9631
- Алексеев Г.В., Радионов В. Ф., Александров Е.И., Иванов Н.Е., Харланенкова Н.Е. Изменение климата Арктики при глобальном потеплении // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2015. № 1(103), С. 32–42.
- Timofeeva, A., Ivanov, V., Yulin, A., and Khotchenkov, S.: Multiyear variability of atmospheric processes and ice cover in the Laptev Sea since 1942 to 2019, *EGU General Assembly2020, Online*, 4–8 May 2020, EGU2020-12269, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-12269,2020>
- Ашик И.М., Иванов В. В., Кассенс Х., Махотин М.С., Поляков И.В. Основные результаты океанологических исследований Северного Ледовитого океана в последнее десятилетие // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2015. № 1(103), С. 42–56.
- Rothrock, D. A., Yu, Y. and Mayakut, G .A. Thinning of Arctic Sea Ice Cover. *Geophys. Res. Let.* 26, 1999, pp. 3469–3472. <https://doi.org/10.1029/1999GL010863>
- Rothrock, D., Zhang, J. & Yu, Y. The Arctic Ice Thickness Anomaly of the 1990s: A Consistent View from Observations and Models. *J. Geophys. Res.* 108, 2003. <https://doi.org/10.1029/2001JC001208>.
- Haas, C., Late-Summer Sea Ice Thickness Variability in the Arctic Transpolar Drift 1991–2001 Derived from Ground-based Electromagnetic Sounding, *Geophys. Res. Lett.*, 31, 2004, L09402. <https://doi.org/10.1029/2003GL019394>.
- Haas, C., Howell, S. (), Ice thickness in the Northwest Passage. *Geophysical Research Letters*. 42., 2015. <https://doi.org/10.1002/2015GL065704>.
- Kwok, R.; Untersteiner, N. The thinning of Arctic sea ice. *Phys. Today* 2011, 64, 36–41. <https://doi.org/10.1063/1.3653854>
- Ricker, R., Hendricks, S., Girard-Ardhuin, F., Kaleschke, L., Lique, C., Tian-Kunze, X., Nicolaus,

- M., and Krumpen, T.: Satellite observed drop of Arctic sea ice growth in winter 2015–2015, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 3236–3245, <https://doi.org/10.1002/2016GL072244>, 2017a.
20. Ricker, R., Hendricks, S., Kaleschke, L., Tian-Kunze, X., King, J., and Haas, C.: A weekly Arctic sea-ice thickness data record from merged CryoSat-2 and SMOS satellite data, *The Cryosphere*, 11, <https://doi.org/10.5194/tc-11-1607-2017>
 21. Stroeve, J.C., Schroeder, D., Tsamados M., Feltham, D. Warm winter, thin ice?. *The Cryosphere*. 12., 2018, 1791-1809. <https://doi.org/10.5194/tc-12-1791-2018>
 22. Егоров А.Г. Изменение возрастного состава и толщины зимнего ледяного покрова арктических морей России в начале XXI в. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2020;66(2):124-143. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-124-143>
 23. Смоляницкий В.М., Тюряков А.Б., Фильчук К.В., Фролов И.Е. Сравнительный анализ прямых измерений толщин льда и высот снега, наблюдений Cryosat-2 и численных оценок системы PIOMAS. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2020; 66(3):337-348. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-337-348> 1607–1623, <https://doi.org/10.5194/tc-11-1607-2017>, 2017b.
 24. Карелин И.Д., Карклин В.П. Припай и заприпайные полыньи арктических морей сибирского шельфа в конце XX – начале XXI века. СПб. Изд. ААНИИ. 2012. 180 с. 16. Опасные ледовые явления для судоходства в Арктике. / Под ред. Е.У. Миронова – СПб. Изд. ААНИИ. 2010. 320 с.
 25. Опасные ледовые явления для судоходства в Арктике. / Под ред. Е.У. Миронова – СПб. Изд. ААНИИ. 2010. 320 с.
 26. Карклин В.П., Карелин И.Д., Юлин А.В., Иванов Н.Е., Усольцева Е.А. Особенности формирования припая в море Лаптевых. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2013. № 3(97), С. 5-14.
 27. РД 52.10.842-2017 Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 9. Гидрометеорологические наблюдения на морских станциях и постах. Часть I. Гидрологические наблюдения на береговых станциях и постах. Введен взамен предыдущего. Дата введения 2018-07-01
 28. Карклин В.П., Хотченков С.В., Юлин А.В., Смоляницкий В.М. Формирование возрастного состава льда в юго-западной части Карского моря в осенне-зимний период. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2017;(3):16-26. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2017-0-3-16-26>
 29. Думанская И.О. Ледовые условия морей азиатской части России. Обнинск: ИФ-СОЦИН, 2017. 640 с.
 30. Зубов Н.Н. О льдах Арктики и Антарктики.- Москва:МГУ, 1956. -60 стр.
 31. Доронин Ю.П. К вопросу о нарастании морского льда // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 1959. No 1. С. 73–79.
 32. Гирс А.А. Основы долгосрочных прогнозов погоды. Л.:Гидрометеоиздат, 1960. -560 с. (с. 330-333)

References:

1. Comiso, J.J. Large decadal decline of the arctic multiyear ice cover. *J. Clim.* 2012, 25, 1176–1193. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00113.1>
2. Petty, A. A., Stroeve, J. C., Holland, P. R., Boisvert, L. N., Bliss, A. C., Kimura, N., and Meier, W. N.: the Arctic sea ice cover 2016: a year of record-low highs and higher-than-expected lows, *The Cryosphere*, 12(2), 433-453, <http://doi.org/10.5194/tc-12-433-2018>, 2018.
3. Stroeve, J. C., Serreze, M. C., Holland, M. M., Kay, J. E., Malanik, J., and Barrett, A. P.: The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis, *Climate Change*, 110, 1005–1027, <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0101-1>, 2012.
4. Serreze, M. C., Stroeve, J., Barrett, A. P., and Boisvert, L. N.: Summer atmospheric circulation anomalies over the Arctic Ocean and their influences on September sea ice extent: A cautionary tale, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 121, 11463–11485, <https://doi.org/10.1002/2016JD025161>, 2016.
5. Stroeve, J. C., Markus, T., Boisvert, L., Miller, J., and Barrett, A.: Changes in Arctic melt season and implications for sea ice loss. *Geophys. Res. Lett.*, 41(4), 1216-1225, <http://doi.org/10.1002/2013GL058951>, 2014.
6. Serreze, M. C., Holland, M. M., and Stroeve, J.: Perspectives on the Arctic's Shrinking Sea-Ice Cover, *Science*, 315, 1533–1536, <https://doi.org/10.1126/science.1139426>, 2007.
7. Egorov A.G., Pavlova E.A. Change in the time of stable ice formation in the Russian Eastern Arctic seas at the beginning of 21st century. *Arctic and Antarctic Research*. 2019;65(4):389-404. (In Russ.) <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-4-389-404>
8. Yulin A.V., Timofeeva A.B., Pavlova E.A., Sharatunova M.V., Hotchenkov S.V. Interannual and seasonal changes the ice cover in the Russian Arctic seas in the modern climatic period. *Trudy GOIN № 220: 44-60. M. 2019 ISSN: 0371-7119 (in Russ.)*
9. Frolov I., Gudkovich Z., Karklin V., Kovalev E., Smolyanitsky V. *Climate Change in Eurasian Arctic Shelf Seas. Centennial Ice Cover Observations. Praxis Publishing Ltd. UK, Chichester. 2009. 164 p.*
10. Ivanov V.V., Alekseyenkov G.A., Korzhikov A.Ya. On improvement of the microcirculation method for long-range weather forecasting in the Kara Sea Hydrometeorological research and Forecasts (*Trudy Hydrometcentra Rossii*), 2018. №4 (370): 105-121. ISSN 2618-9631 (In Russ.)

11. Alekseev, G. V., Radionov, V. F., Alexandrov, E. I., Ivanov, N. E., and Kharlanenkova, N. E., Climate change in the Arctic under global warming. *Arctic and Antarctic Research*. 2015. № 1(103): 32-42. (In Russ.)
12. Timofeeva, A., Ivanov, V., Yulin, A., and Khotchenkov, S.: Multiyear variability of atmospheric processes and ice cover in the Laptev Sea since 1942 to 2019, EGU General Assembly2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-12269, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-12269,2020>
13. Ashik I. M., Ivanov V. V., Kassens H., Makhotin M. S., Polyakov I. V. General results of Arctic Ocean oceanological studies in the last decade. *Arctic and Antarctic Research*. 2015. № 1(103): 42-56. (In Russ.)
14. Rothrock, D. A., Yu, Y. and Mayakut, G .A. Thinning of Arctic Sea Ice Cover. *Geophys. Res. Lett.* 26, 1999, pp. 3469-3472. <https://doi.org/10.1029/1999GL010863>
15. Rothrock, D., Zhang, J. & Yu, Y. The Arctic Ice Thickness Anomaly of the 1990s: A Consistent View from Observations and Models. *J. Geophys. Res.* 108, 2003. <https://doi.org/10.1029/2001JC001208>.
16. Haas, C., Late-Summer Sea Ice Thickness Variability in the Arctic Transpolar Drift 1991–2001 Derived from Ground-based Electromagnetic Sounding, *Geophys. Res. Lett.*, 31, 2004, L09402. <https://doi.org/10.1029/2003GL019394>.
17. Haas, C., Howell, S. (), Ice thickness in the Northwest Passage. *Geophysical Research Letters*. 42., 2015. <https://doi.org/10.1002/2015GL065704>.
18. Kwok, R.; Untersteiner, N. The thinning of Arctic sea ice. *Phys. Today* 2011, 64, 36–41. <https://doi.org/10.1063/1.3653854>
19. Ricker, R., Hendricks, S., Girard-Arduin, F., Kaleschke, L., Lique, C., Tian-Kunze, X., Nicolaus, M., and Krumpen, T.: Satellite observed drop of Arctic sea ice growth in winter 2015–2015, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 3236–3245, <https://doi.org/10.1002/2016GL072244, 2017a>.
20. Ricker, R., Hendricks, S., Kaleschke, L., Tian-Kunze, X., King, J., and Haas, C.: A weekly Arctic sea-ice thickness data record from merged CryoSat-2 and SMOS satellite data, *The Cryosphere*, 11. <https://doi.org/10.5194/tc-11-1607-2017>
21. Stroeve, J.C., Schroeder, D., Tsamados M., Feltham, D. Warm winter, thin ice?. *The Cryosphere*. 12., 2018, 1791-1809. [10.5194/tc-12-1791-2018](https://doi.org/10.5194/tc-12-1791-2018). <https://doi.org/10.5194/tc-12-1791-2018>
22. Egorov A.G. The Russian Arctic seas ice age composition and thickness variation in winter periods at the beginning of the 21st century. *Arctic and Antarctic Research*. 2020;66(2):124-143. (In Russ.) <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-124-143>
23. Smolyanitsky V.M., Turyakov A.B., Filchuk K.V., Frolov I.E. Comparison of direct measurements of sea ice thickness and snow height, CryoSat-2 observations and PIOMAS numerical estimates. *Arctic and Antarctic Research*. 2020;66(3):337-348. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-337-348> (In Russ.)
24. Karelin I.D., Karklin V.P. Landfast ice and flaw polynyas of the Arctic seas of Siberian offshore in late XX – early XXI century. SPb. AARI Publ. 2012. 180 p. (In Russ.)
25. Ice phenomena threatening Arctic shipping / Ed. Mironov Ye.U. – SPb. AARI Publ. 2010. 320 p. (In Russ.)
26. Karklin V. P., Karelin I. D., Yulin A.V., Ivanov N.E., Usoltseva E. A. Landfast ice formation features in the Laptev Sea. *Arctic and Antarctic Research*. 2013. № 3(97):5-14.
27. RD 52.10.842-2017 Manual for hydrometeorological stations and posts. Issue 9. Hydrometeorological observations at sea stations and posts. Part I. Hydrological observations at coastal stations and posts. Implemented instead of the previous one. Implementation date 2018-07-01 (In Russ.)
28. Karklin V.P., Hotchenkov S.V., Yulin A.V., Smolyanitsky V.M. Formation of the stages of sea ice development composition in the southwestern part of the Kara sea during autumn-winter season. *Arctic and Antarctic Research*. 2017;(3):16-26. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2017-0-3-16-26> (In Russ.)
29. Dumanskaya I. O. Ice conditions of the seas of the Asian part of Russia. Moscow: IG–SOCIN, 2017, 640 p. (In Russ.)
30. Zubov N. N. Concerning the ice of the Arctic and Antarctic.- Moscow: Moscow State University, 1956. -60 p. (In Russ.)
31. Doronin Yu. P. Concerning the issue of sea ice development. *Arctic and Antarctic Research* 1959. No. 1. pp. 73-79. (In Russ.)
32. Girs A. A. Fundamentals of long-term weather forecasts. L.: Hydrometeoizdat, 1960. 560 p. (p. 330-333)