

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОЛОЖЕНИЯ ГРАНИЦ СТАРЫХ ЛЬДОВ В ВЕСЕННИЙ ПЕРИОД И ОСТАТОЧНЫХ ЛЬДОВ В ОСЕННИЙ ПЕРИОД В СЕВЕРНОМ ЛЕДОВИТОМ ОКЕАНЕ В ТЕКУЩЕМ КЛИМАТИЧЕСКОМ ПЕРИОДЕ

Е.С. Виноградная^{1,2}, Е.С. Егорова¹, Т.В. Шевелева², А.В. Юлин¹

¹ ГНЦ РФ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», г. Санкт-Петербург, Россия

² Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург, Россия

✉ liza.vinogradnyaya@yandex.ru, egorova@aari.ru, bahus78@bk.ru, icefor@aari.ru

В работе рассматривается межгодовая изменчивость положения южной границы старых льдов в период максимального накопления ледяного покрова (в апреле), южной границы старых (многолетних и двухлетних) и остаточных однолетних льдов, сохранившихся после летнего таяния (в сентябре), а также изменение количества старых и однолетних льдов в балансе льдов Северного Ледовитого океана (СЛО). Изменение положения границ анализируется для наиболее динамичного Евразийско-алюскинского сектора СЛО.

Показано, что за последние два десятилетия наблюдается устойчивое сокращение площади старых льдов и смещение их южной границы на север. Это смещение меньше в западной части рассматриваемого сектора (0-1,0 градуса по широте или от 0 до 110 км) и более выражено в восточной части (2,5-5,0 градусов по широте или от 300 до 550 км). Изменение положения границы старых льдов за последние двадцать лет показывает, что на акватории океана, где ранее наблюдались преимущественно старые льды, произошло их замещение однолетними льдами.

Анализ положения южной границы дрейфующих льдов в конце периода таяния (в сентябре) также показывает её существенное смещение на север. Это смещение одинаково хорошо проявляется как в западной, так и в восточной частях рассматриваемого сектора, и составляет 1,0–2,0° по широте или 110–220 км. Акватория океана, которая до конца XX столетия в сентябре оставалась покрытой льдами, в течение двух последних десятилетий полностью и регулярно очищается ото льдов.

Проведенная экспертная оценка изменения количества старых и однолетних льдов в СЛО на период их максимального накопления показывает, что с 2002 г. в балансе льдов начинают преобладать однолетние льды, причем их преобладание носит нарастающий характер. За последние 5 лет количественное отношение между старыми и однолетними льдами в СЛО в конце зимнего сезона в среднем составляет примерно 37% и 63% соответственно.

Ключевые слова: Северный Ледовитый океан, ледяной покров, распространение старых льдов, распространение остаточных льдов, старые и однолетние льды.

VARIABILITY OF THE SPRING OLD ICE AND FALL RESIDUAL ICE BOUNDARY IN THE ARCTIC OCEAN OVER THE CURRENT PERIOD OF CLIMATE CHANGES

E.S. Vinogradnyaya^{1,2}, E.S. Egorova¹, T.V. Sheveleva², A.V. Yulin¹, Cand.Sc.

¹ State Scientific Center of the Russian Federation the Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

² Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

The present study deals with interannual variability investigation of the April old and the September second-year ice southern boundaries, as well as the impact of the old and the first-year ice amount on the Arctic Ocean ice mass balance. The residual ice includes the old and

the residual first-year ice that has survived a summer's melt. The boundaries displacement is analyzed within the Eurasian-Alaskan sector, the most robust part of the Arctic Ocean.

It is noted that there is the steady reduction of the April old ice amount and its boundary shift toward the north over the recent two decades. The eastern part of sector studied demonstrates the greater displacement than the western one with the value of about 2,5–5,0 degrees of latitude or 300–550 km. The replacement of the old ice by the first-year ice is shown to occur over the current period of climate changes.

In addition, the September residual ice southern boundary have prominent shift to the north in both eastern and western parts of study area. This displacement is 1,0–2,0 degrees of latitude or 110–220 km. Until the end of the 20th century, this region has been covered by ice, but the complete and steady ice clearance exhibits over the two recent decades.

Since 2002, the first-year ice prevailed on the Arctic Ocean ice mass balance in April (63% vs 37% of the old ice coverage over the recent five years). It should be noted that the first-year ice amount has increased gradually from year to year.

Keywords: Arctic, ice cover, old ice boundary variability, residual ice boundary variability, old and first-year ice.

Статья получена: 04.06..2020

Принята к публикации: 01.07.2020

Опубликована онлайн: 03.07.2020

Введение.

Ледяной покров Северного Ледовитого океана (СЛО) является составной частью климатической системы «атмосфера-лед-океан». Изучение изменений, происходящих с ледяным покровом в СЛО, является важной задачей для понимания происходящих в океане климатических процессов.

Надежные данные о распределении и состоянии ледяного покрова СЛО имеются с 1978 г. — с начала регулярных спутниковых наблюдений. Современные методы спутникового мониторинга позволяют с большой точностью определять распределение льда и оценивать площадь ледяного покрова в течение всего годового цикла его развития. Менее успешно обстоят дела с дистанционным измерением толщины льда. Методов точной оценки толщины льда с помощью искусственных спутников Земли (ИСЗ) пока не существует. Это связано в первую очередь с отсутствием надежной измерительной аппаратуры, позволяющей дистанционно оценить разный по толщине ледяной покров [1, 2]. Кроме того, постоянно действующие динамические процессы приводят к механическому изменению толщины льда вследствие торошения, наслоения и появления разрывов, в результате чего ледяной покров становится неоднородным

E.S. Vinogradnyaya, E.S. Egorova, T.V. Sheveleva, A.V. Yulin

VARIABILITY OF THE SPRING OLD ICE AND FALL RESIDUAL ICE BOUNDARY IN THE ARCTIC OCEAN OVER THE CURRENT PERIOD OF CLIMATE CHANGES

по линейным размерам и толщине.

В настоящее время при построении ледовых карт надежно оценивают толщину льда по основным возрастным градациям: старые, многолетние, двухлетние, остаточные, однолетние, молодые и начальные льды. Каждая возрастная градация связана с определенным диапазоном толщины льда [3, 4].

Старые льды включают в себя многолетние и двухлетние льды. В связи со сложностью идентификации многолетних и двухлетних льдов зачастую выделяют одну общую группу — старые льды, средняя толщина которых может достигать 200–250 см и более.

Однолетние льды — это льды осенне-зимнего образования. Они включают в себя однолетние тонкие, средние и толстые льды в диапазоне толщин от 30 до 120 см и выше. Однолетние льды обычно выделяются по трем указанным группам на детализированных ледовых картах, но на обзорных ледовых картах объединяются в одну возрастную группу однолетних льдов.

Остаточные однолетние льды (остаточные льды) — это однолетние льды, которые сохраняются после летнего таяния и вступают в новую фазу осеннего ледообразования, а после 1 января нового года становятся двухлетними льдами и таким

образом пополняют общее количество старых льдов в океане.

Одним из наиболее важных показателей ледяного покрова, характеризующих его состояние, является распределение и количество старых и однолетних льдов в период их максимального накопления (в апреле), а также старых и остаточных льдов в конце периода разрушения (в сентябре). Эти показатели хорошо определяются по данным спутникового мониторинга и фиксируются на картах распределения льда [2, 3, 4].

Распределение льдов различного возраста имеет важное научное и практическое значение. Количество старых льдов и их распределение в СЛО в конце зимнего сезона накопления (в апреле) определяет мощность ледяного покрова перед началом летнего таяния. Эта характеристика используется в моделях и долгосрочных прогнозах ожидаемого типа ледовых условий в арктических морях в предстоящий летний период [5, 6].

Площадь старых и остаточных льдов в конце периода таяния (в сентябре) являются достоверным показателем интенсивности прошедших летних и начала осенних ледовых процессов. Граница дрейфующих льдов в сентябре очерчивает акваторию океана, на которой наблюдается нулевой теплозапас в поверхностном слое воды. Среди льдов, сохранившихся после летнего таяния, в первую очередь начинается устойчивое ледообразование при переходе температуры воздуха через ноль. Чем ближе к берегу располагается граница дрейфующих льдов в осенний период, тем быстрее начинается ледообразование в арктических морях и на путях плавания судов [5, 7].

И наконец, наиболее интересной проблемой является изменение количества старых и однолетних льдов в общем балансе в СЛО. Количество старых льдов в СЛО, несмотря на их большую толщину, не является постоянной величиной. Часть их, попавшая в результате дрейфа в южные и прибрежные районы арктических морей, может быть разрушена в результате таяния, а другая — вынесена в пролив Фрама. Основная же масса старых льдов сохраняется после летнего таяния,

и в процессе нового осенне-зимнего нарастания становится мощнее однолетних льдов, появившихся на акватории океана в осенний сезон. Однако, как показывают наблюдения, часть старых льдов площадью около 70–80 тыс. км² ежегодно безвозвратно исчезает из ледового баланса океана и замещается однолетними льдами. Таким образом, можно говорить об условно постоянной динамике старых льдов на акватории СЛО.

Однолетние льды, образующиеся осенью и зимой, носят сезонный характер. Например, припайные льды в районе Новосибирских островов, которые за осенне-зимний сезон могут нарастать до 210–240 см (по данным полярных станций Тикси, Котельный и Санникова), с повторяемостью 80% исчезают в результате летнего таяния (по данным наблюдений, с 1940 г.).

В связи с этим, проведенный в данной работе анализ распространения и количества старых, остаточных и однолетних льдов в СЛО является чрезвычайно полезным для оценки происходящих климатических изменений и решения целого ряда практических задач.

Исходные данные

Исходные данные были получены из открытых источников, размещенных на интернет-портале Государственного научного центра РФ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (ГНЦ РФ «ААНИИ»). Границы положения основных возрастных групп льдов в различные сезоны года — старые, однолетние, молодые и остаточные льды — отражены на картах распределения ледяного покрова, составленных по данным ИСЗ [8].

Для проведения анализа были использованы обзорные ледовые карты, содержащие в себе информацию о распределении ледяного покрова СЛО. Рассматривалось положение границы различных льдов в наиболее динамичном Евразийско-аляскинском секторе СЛО (между меридианами 0°–180° в.д.–150° з.д.).

При помощи ГИС технологий были получены данные о положении границ зоны с преобладанием старых льдов в апреле и

дрейфующих льдов в сентябре за период с 1999 по 2018 гг. (20-летний период). Для оценки площади ледяного покрова СЛО использовались среднемесячные значения площади льда за ряд наблюдений с 1978 по 2019 гг. Архив данных доступен на сайте ГНЦ РФ «ААНИИ» по ссылке [9].

Постановка задачи

Многочисленные исследования изменения ледяного покрова в СЛО показывают, что на рубеже XX–XXI вв. наблюдается устойчивое сокращение площади льдов, как в зимний, так и в летний сезоны [10, 11, 12, 13]. Анализ динамики ледовых условий на трассах плавания по Северному Морскому пути за период с 1997 г. также показывает значительное сокращение и даже полное исчезновение участков со старыми льдами [14, 15].

На рисунке 1 приведен многолетний ход среднемесячных значений площадей ледяного покрова для трех наиболее характерных сезонов года: максимального накопления ледяного покрова (апрель), максимального сокращения ледяного покрова (сентябрь), а также среднегодовых значений за период наблюдений с 1978 по 2019 гг. Как следует из представленных графиков, изменение площади льда в СЛО проявляет устойчивую тенденцию к уменьшению. Линейное (по тренду) уменьшение площади ледяного покрова за 42-летний ряд составляет – 18 тыс. км² за год для апреля, – 80 тыс. км² за год для сентября и – 40 тыс. км² в целом за год (см. рис. 1). Однако, как отмечается рядом авторов [12, 13, 14], уменьшение площади ледяного покрова в СЛО происхо-

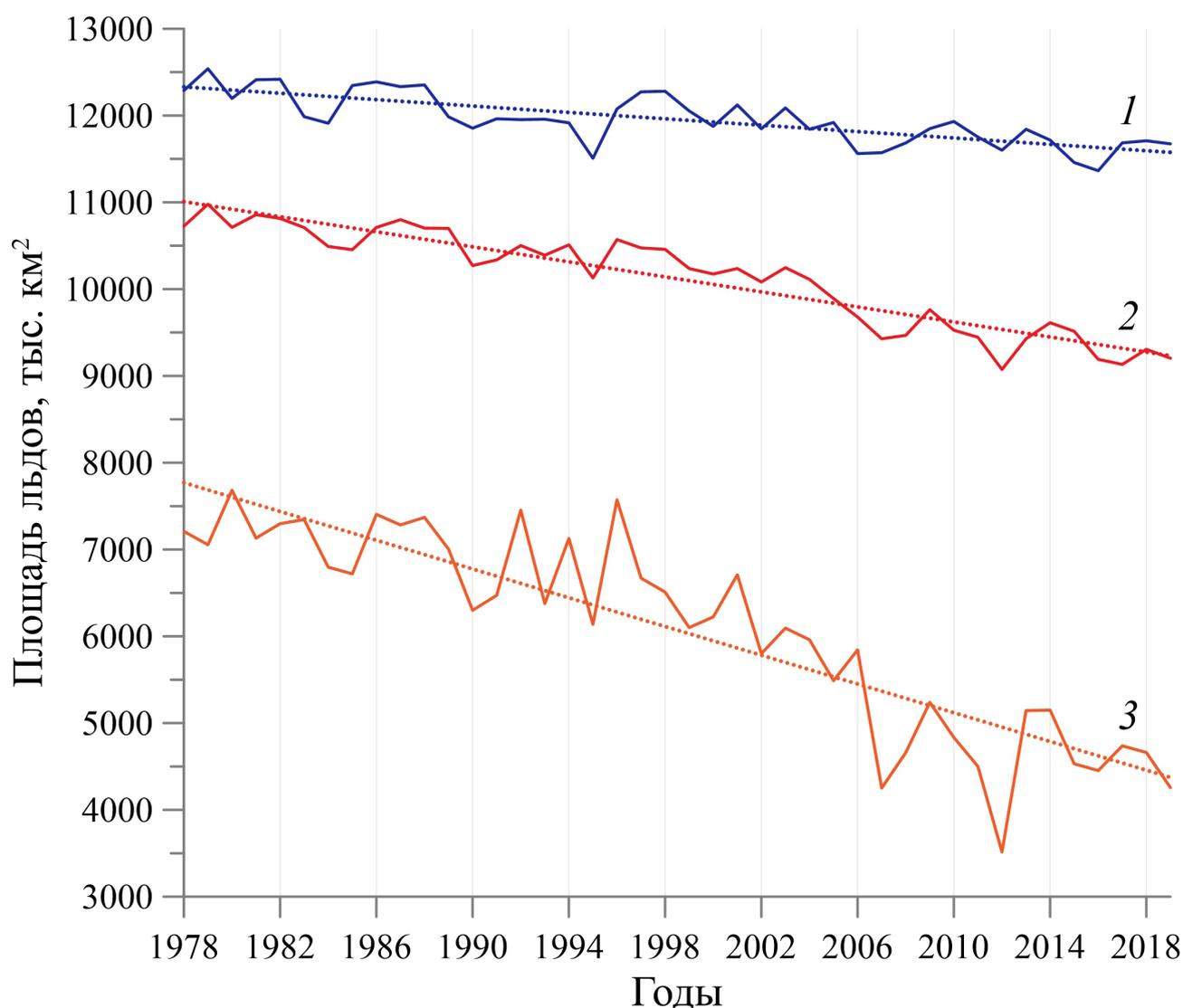


Рисунок 1 – Межгодовые изменения значений площади льда в СЛО: в конце зимнего сезона максимального накопления в апреле (1), среднегодовой площади (2), в конце летнего сезона максимального разрушения в сентябре (3), и их линейные тренды (пунктиром).

E.S. Vinogradnyaya, E.S. Egorova, T.V. Sheveleva, A.V. Yulin

VARIABILITY OF THE SPRING OLD ICE AND FALL RESIDUAL ICE BOUNDARY IN THE ARCTIC OCEAN OVER THE CURRENT PERIOD OF CLIMATE CHANGES

дит неравномерно. За последние 20 лет наблюдается ускорение сокращения площади морского льда, особенно хорошо выраженное в летний период (линия 3 на рис. 1).

За анализируемый 42-летний ряд произошло общее уменьшение площади льдов, наблюдаемых в СЛО. В зимний период они сократилась на 600–700 тыс. км², и, соответственно, на такую же величину увеличилась площадь чистой воды в западных морях Арктики (в Гренландском и Баренцевом). В летний период сокращение площади льдов составило 2500–3000 тыс. км² — на такую же величину увеличилась площадь чистой воды по всем окраинным морям СЛО от Баренцева до Бофорта. В последнее десятилетие (2010–2019 гг.) СЛО в летний период начал очищаться почти на 2/3 (т.е. на 68%) своей акватории. Такое большое сокращение площади ледяного покрова в СЛО не могло не отразиться на распределении и общем количестве льдов различных возрастных групп в общем балансе льдов океана.

В настоящей работе рассматриваются три важных вопроса, относящихся к ледяному покрову СЛО:

- изменение положения границы старых льдов на месяц максимального накопления ледяного покрова (в апреле),
- изменение положения границы дрейфующих льдов (старых и остаточных однолетних) на месяц максимального сокращения ледяного покрова (в сентябре),
- изменение количества старых и од-

нолетних льдов в общем балансе льдов в СЛО за период спутниковых наблюдений.

Обсуждение результатов

Динамика положения границы старых льдов. На рисунке 2 приведено распределение ледяного покрова в апреле в годы с малым (2008 г.) и большим (2018 г.) количеством старых льдов. При приблизительно одинаковой площади льдов в СЛО в эти годы, составляющей около 11700 тыс. км², старые льды в первом случае занимают около 30% акватории океана, а их граница выходит из приполюсного района и значительно смещается к побережью Гренландии, а во втором — около 45% с положением границы, близким к северным границам российских арктических морей. В 70–80-е годы прошлого столетия по данным ледовых разведок установлено, что граница старых льдов зачастую проходила непосредственно по акватории российских арктических морей.

Для оценки изменений положения границы старых льдов в конце зимнего сезона в Евразийско-аляскинском секторе СЛО за последние 20 лет была определена ее широта на меридианах с шагом по долготе в 10°. Далее были рассчитаны основные статистики положения границы (среднее $\Gamma_{\text{ср}}$, минимальное $\Gamma_{\text{мин}}$ и максимальное $\Gamma_{\text{макс}}$ положение) и показатели статистической изменчивости (амплитуда A и среднеквадратическое отклонение σ), которые дают возможность оценить разброс положения границы старых льдов. Основные статистики представлены в та-

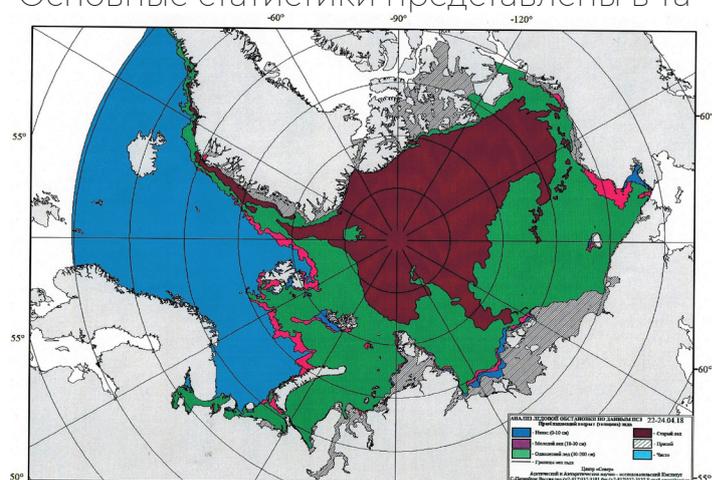
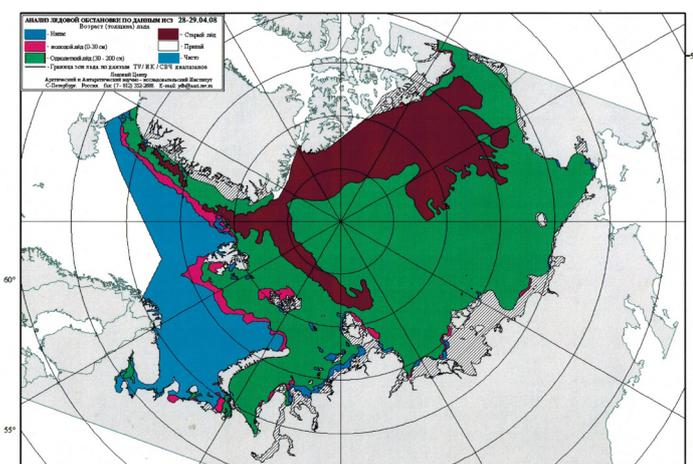


Рисунок 2 – Распределение ледяного покрова в СЛО и его морях в месяц максимального развития (апрель) с выделенной границей зоны преобладания старых льдов в годы малого a , слева) и большого их количества (б, справа).

Таблица 1

Положение границы старых льдов в месяц максимального накопления льда (апрель) на меридианах за ряд наблюдений 1999–2018 гг. (° с.ш.)

Параметр, °	Меридианы, ° долготы																					
	Восточная																		Западная			
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	170	160	150
Г _{ср}	80,6	81,6	82,7	83,4	83,9	84,3	84,7	85,0	84,9	85,0	84,5	84,9	85,5	85,3	85,0	84,1	80,7	80,4	78,6	77,8	76,8	75,0
Г _{мин}	79,0	80,0	80,5	80,5	80,0	82,0	82,0	81,5	78,8	81,9	81,0	77,5	79,5	78,5	77,5	76,5	74,0	73,5	73,0	72,0	71,5	71,0
Г _{макс}	82,9	86,9	89,1	89,2	89,2	89,1	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	87,4	87,8	88,0	88,2	88,1
Δ	3,9	6,9	8,6	8,7	8,2	7,1	8,0	8,5	11,2	8,1	9,0	12,5	10,5	11,5	12,5	13,5	16,0	13,9	14,8	16,0	16,7	17,1
σ	1,0	1,8	2,1	2,2	2,1	1,9	2,3	2,3	2,7	2,6	3,0	3,7	3,2	3,6	4,0	4,6	5,3	4,8	4,3	4,2	4,2	4,3

блице 1.

Из анализа данных таблицы 1 следует, что за последний 20-летний период наблюдаются значительные изменения в положении границы старых льдов. Размах изменений значительно возрастает с запада на восток. Если в районе меридианов 0–60° в.д. изменения положения границы по амплитуде составляет 4,0–8,0° по широте или 440–880 км, а среднеквадратическое отклонение равняется 1,0–2,0° широты или 110–220 км, то в районе меридианов 160° в.д. – 160° з.д. изменения в положении границы по амплитуде составляет 16,0–17,0° по широте или 1800–1900 км,

а среднеквадратическое отклонение — 4,0–5,0° широты или 440–550 км. Таким образом, колебания положения границы старых льдов в восточной части Евразийско-аляскинского сектора СЛО в четыре раза больше по сравнению с западной частью.

Полученные данные позволяют также провести сравнительный анализ положения границы старых льдов, в различные климатические периоды. На рисунке 3 приведено положение границы старых льдов за предшествующий период 1954–1991 гг. [15] и за текущий период 1999–2018 гг.

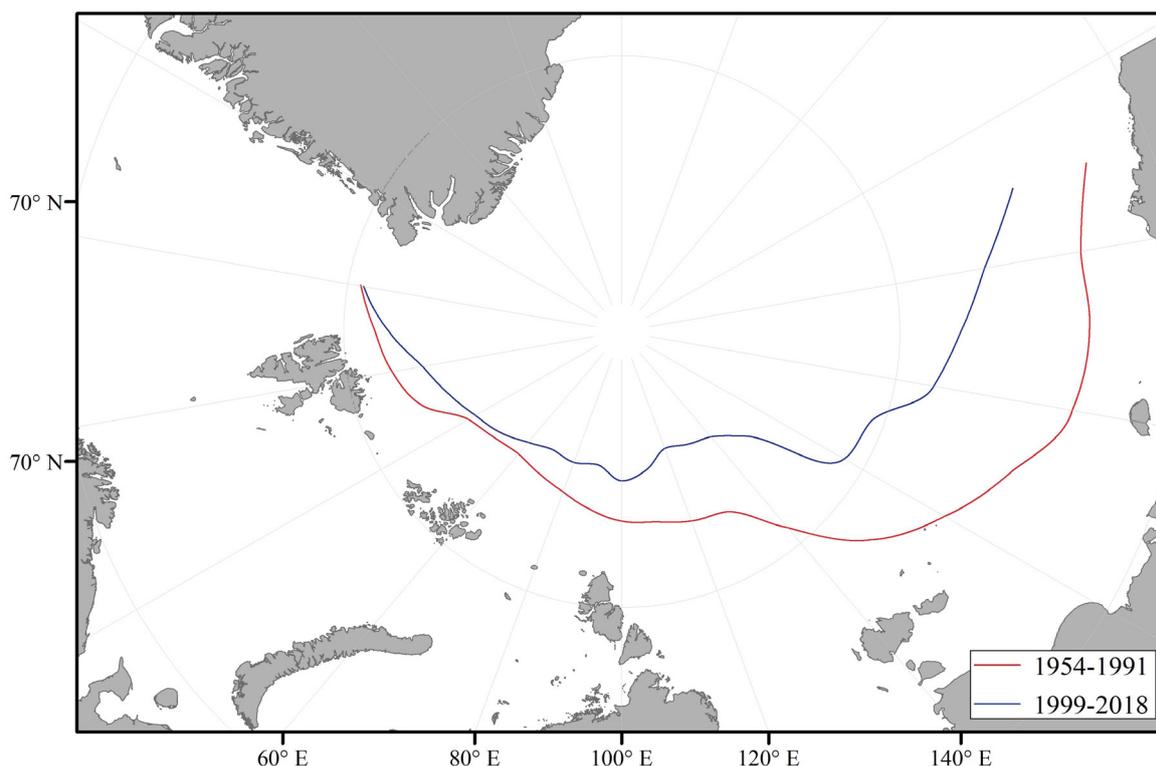


Рисунок 3 – Изменение положения границы старых льдов в СЛО в апреле для двух климатических периодов: 1954–1991 гг. (красная линия) и 1999–2018 гг. (синяя линия).

E.S. Vinogradnyaya, E.S. Egorova, T.V. Sheveleva, A.V. Yulin

VARIABILITY OF THE SPRING OLD ICE AND FALL RESIDUAL ICE BOUNDARY IN THE ARCTIC OCEAN OVER THE CURRENT PERIOD OF CLIMATE CHANGES

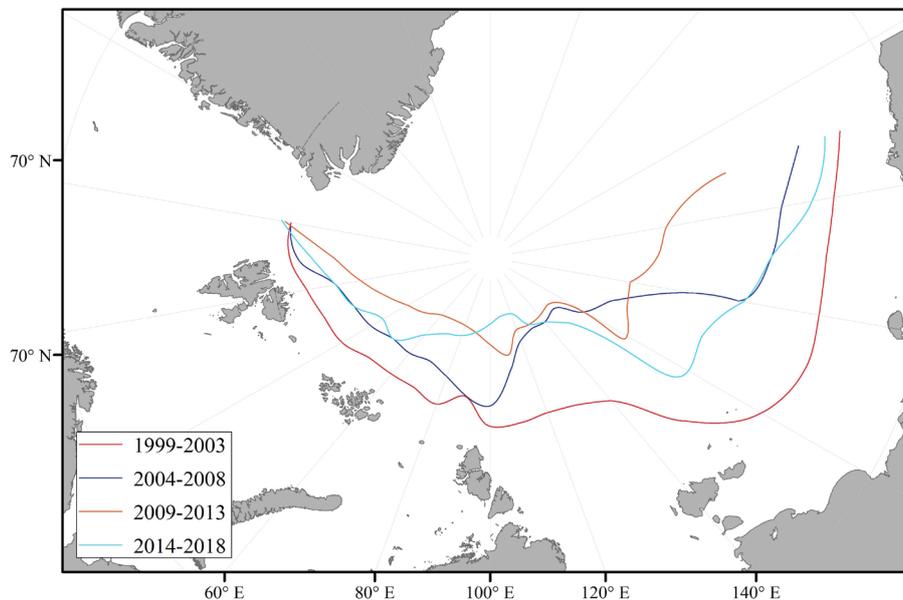


Рисунок 4 – Изменение положения границы старых льдов в СЛО в апреле для четырех пятилетий за период 1999–2018 гг.: 1999–2003 гг. (красная линия), 2004–2008 гг. (синяя линия), 2009–2013 гг. (оранжевая линия) и 2014–2018 гг. (бирюзовая линия).

Приведенное положение границы старых льдов за два климатических периода показывает, что за последнее 20-летие наблюдается смещение южной границы старых льдов к северу. Это смещение менее выражено в западной части Евразийско-аляскинского сектора СЛО (здесь оно составляет $0,0\text{--}1,0^\circ$ по широте или $0\text{--}110$ км) и более значительно выражено в восточной части (составляет $2,5\text{--}5,0^\circ$ или $300\text{--}550$ км). В восточной части Евразийско-аляскинского сектора СЛО смещение границы старых льдов носит более глубокий характер.

Смещение границы старых льдов на север подтверждает наблюдаемое общее сокращение количества старых льдов в СЛО. На акватории океана, на которой ра-

нее наблюдались старые льды, произошло их замещение однолетними льдами.

Для более детального анализа изменений в положении границы старых льдов за последнее 20 лет, исследуемый период был разбит на четыре промежутка по 5 лет. Такая детализация позволила установить, как изменялось положение границы старых льдов внутри рассматриваемого двадцатилетнего периода. На рисунке 4 приведено положение границы старых льдов в месяц максимального нарастания ледяного покрова, последовательно за пятилетия с 1999 по 2018 гг.

В первый пятилетний период 1999–2003 гг. смещение границы к северу было незначительным, и гра-

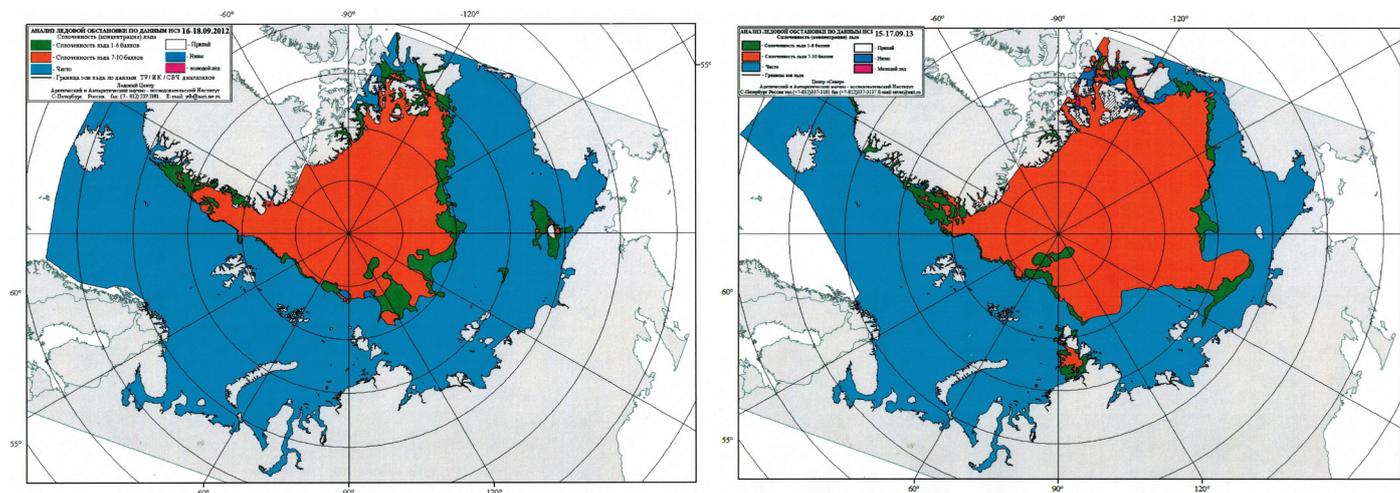


Рисунок 5 – Распределение ледяного покрова в СЛО и его морях в период максимального сокращения в сентябре в годы с малым (а, слева) и большим количеством старых и остаточных однолетних льдов.

ница старых льдов наблюдалась у северных границ российских арктических морей. Однако в последующие пятилетия смещение границы стало более существенным. Так, граница старых льдов начала последовательно смещаться на север в пятилетие 2004–2008 гг. В пятилетие 2009–2013 гг. это смещение достигло наибольшей величины. В последнее пятилетие 2014–2018 гг. наблюдалась стабилизация положения границы, и даже некоторое ее смещение в южном направлении, менее выраженное в западной части сектора и более — в восточной части. Тем не менее, общая тенденция направления смещения южной границы старых льдов к северу сохранялась. В период с 2004 по 2018 гг. тенденция в изменении положения границы усилилась, что подтверждает выводы, полученные рядом исследователей, об ускорении процессов потепления и усиления их последствий в последние 10–15 лет [16, 17, 18].

Динамика положения южной границы дрейфующих льдов (старых и остаточных однолетних) в конце летнего периода.

На рисунке 5 приведено распределение ледяного покрова в сентябре в годы с малым (2012 г.) и большим количеством (2013 г.) старых и остаточных льдов. В первом случае их площадь в середине сентября составила 4754 тыс. км², а во втором — 5983 тыс. км². Величина более чем в 1200 тыс. км² хорошо иллюстрируют большую разницу в площади старых и остаточных однолетних льдов, которые могут

сохраняться после летнего таяния в СЛО даже в последнее десятилетие малой ледовитости (см. рис. 5).

Сохранившиеся льды оказывают большое влияние на формирование ледовых условий в СЛО в осенний период. Как уже отмечалось выше, их южная граница очерчивает акваторию моря, на которой в первую очередь начинается осеннее ледообразование. Кроме того, с началом осеннего ледообразования толщина этих льдов быстро увеличивается, а после 1 января нового года остаточные однолетние льды переходят в градацию двухлетних льдов, пополняя количество старых льдов. Увеличение толщины остаточных льдов происходит более значительно по сравнению с молодыми льдами осеннего образования. Эти льды играют важную роль в ледовом балансе морей последующего навигационного периода.

Для оценки изменения положения границы дрейфующих льдов (старых льдов и остаточных однолетних) в Евразийско-аляскинском секторе СЛО в конце летнего сезона за последние 20 лет была определена ее широта на меридианах с шагом по долготе в 10°. Как и в предыдущем случае (см. выше табл. 1), кроме основных статистик (среднего $\Gamma_{\text{ср}}$, минимального $\Gamma_{\text{мин}}$ и максимального $\Gamma_{\text{макс}}$ положения) были рассчитаны показатели изменчивости (амплитуда A и среднеквадратическое отклонение σ), которые дают возможность оценить разброс положения южной границы дрейфующих льдов. Рассчитанные характеристики сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Положение южной границы дрейфующих льдов на период максимального нарастания льда (апрель–май) на выбранных меридианах за ряд наблюдений 1999–2018 гг. (° с.ш.)

Параметр, °	Меридианы, ° долготы																					
	Восточная																		Западная			
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	170	160	150
$\Gamma_{\text{ср}}$	80,6	81,6	82,7	83,4	83,9	84,3	84,7	85,0	84,9	85,0	84,5	84,9	85,5	85,3	85,0	84,1	80,7	80,4	78,6	77,8	76,8	75,0
$\Gamma_{\text{мин}}$	79,0	80,0	80,5	80,5	80,0	82,0	82,0	81,5	78,8	81,9	81,0	77,5	79,5	78,5	77,5	76,5	74,0	73,5	73,0	72,0	71,5	71,0
$\Gamma_{\text{макс}}$	82,9	86,9	89,1	89,2	89,2	89,1	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	87,4	87,8	88,0	88,2	88,1	
A	3,9	6,9	8,6	8,7	8,2	7,1	8,0	8,5	11,2	8,1	9,0	12,5	10,5	11,5	12,5	13,5	16,0	13,9	14,8	16,0	16,7	17,1
σ	1,0	1,8	2,1	2,2	2,1	1,9	2,3	2,3	2,7	2,6	3,0	3,7	3,2	3,6	4,0	4,6	5,3	4,8	4,3	4,2	4,2	4,3

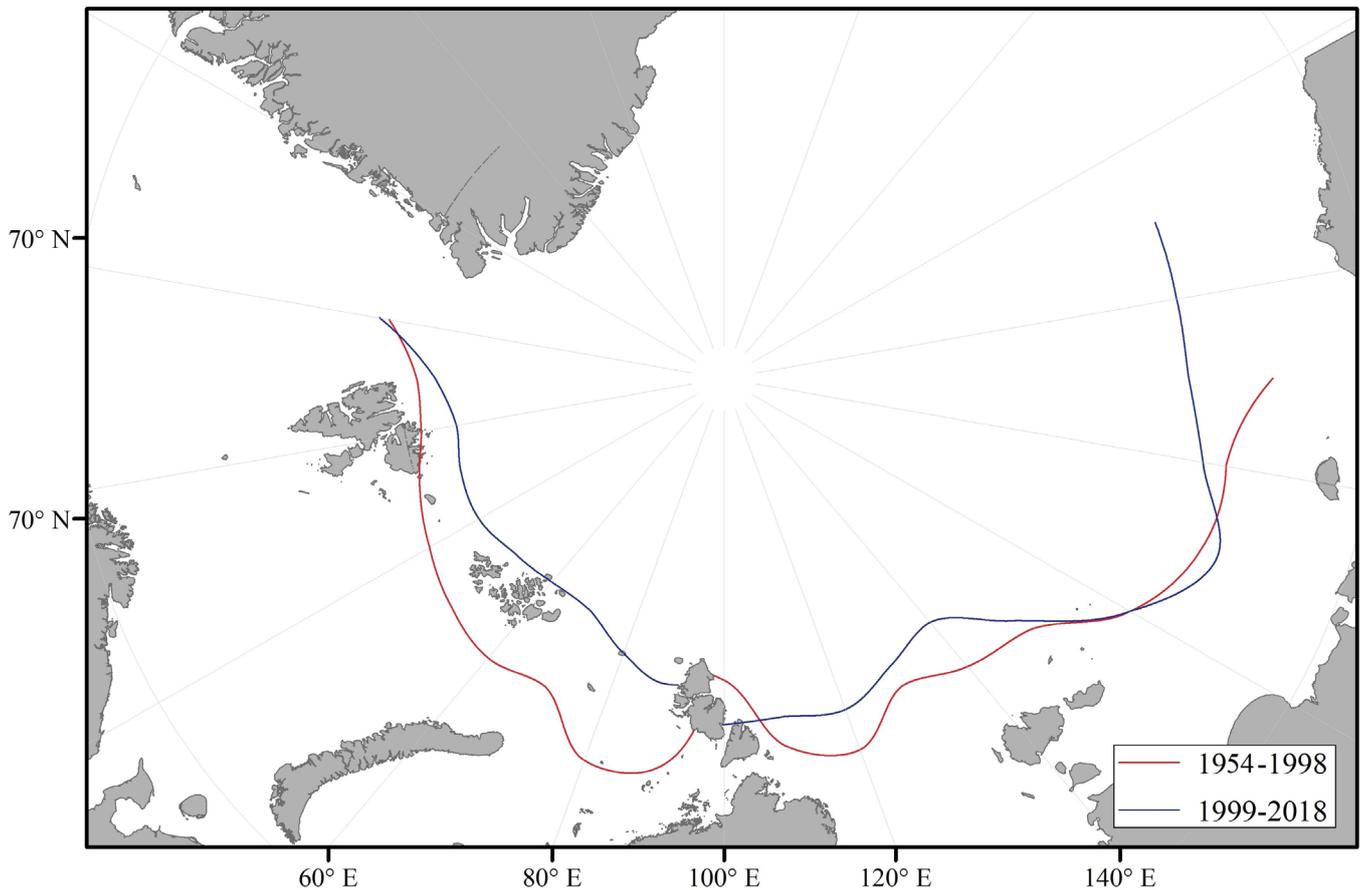


Рисунок 6 – Изменение положения южной границы дрейфующих льдов в сентябре для двух климатических периодов: 1954–1998 гг. (красная линия) и 1999–2018 гг. (синяя линия).

Как следует из таблицы 2, за последние 20 лет наблюдаются значительные изменения в положении южной границы дрейфующих льдов в конце летнего периода, которые увеличиваются с запада на восток. Если в западной части Евразийско-аласкинского сектора СЛО, в районе меридианов 0–60° в.д. изменения в положении южной границы льдов имеет амплитуду 2,0–7,0° по широте или 220–770 км, а среднее квадратическое отклонение составляет 0,6–1,9° широты или 70–220 км, то в восточной части изменения более существенны. Так, в районе меридианов 160° в.д. – 160° з.д. изменения в положении границы льдов по амплитуде составляет 9,0–16,0° по широте или 1000–1770 км, а среднее квадратическое отклонение — 2,0–4,0° широты или 220–440 км. Таким образом, изменения в положении южной границы дрейфующих льдов (старых и остаточных однолетних) в восточной части Евразийско-аласкинского сектора СЛО в 2 раза больше, чем в западной части.

Полученные данные позволяют также провести сравнительный анализ положе-

ния южной границы дрейфующих льдов в сентябре, в различные климатические периоды.

Положение южной границы дрейфующих льдов за предшествующий период 1954–1998 гг. [4, 15] и за период 1999–2018 гг. приведены на рисунке 6.

Сравнительный анализ положения границ дрейфующих льдов в разные климатические периоды показывает, что в последний двадцатилетний период с 1999 по 2018 гг. в Евразийско-аласкинском секторе СЛО наблюдается существенное смещение их южной границы на север (рис. 6). Это смещение одинаково хорошо проявляется как в западной, так и в восточной части рассматриваемого сектора и составляет 1,0–2,0° по широте или 110–220 км. Акватория океана, которая в предыдущий климатический период до 1999 г. в летний период была покрыта старыми и остаточными льдами, в два последних десятилетия полностью очищается ото льдов.

Для более детального анализа изменений в положении южной границы дрейфующих льдов в сентябре за период с

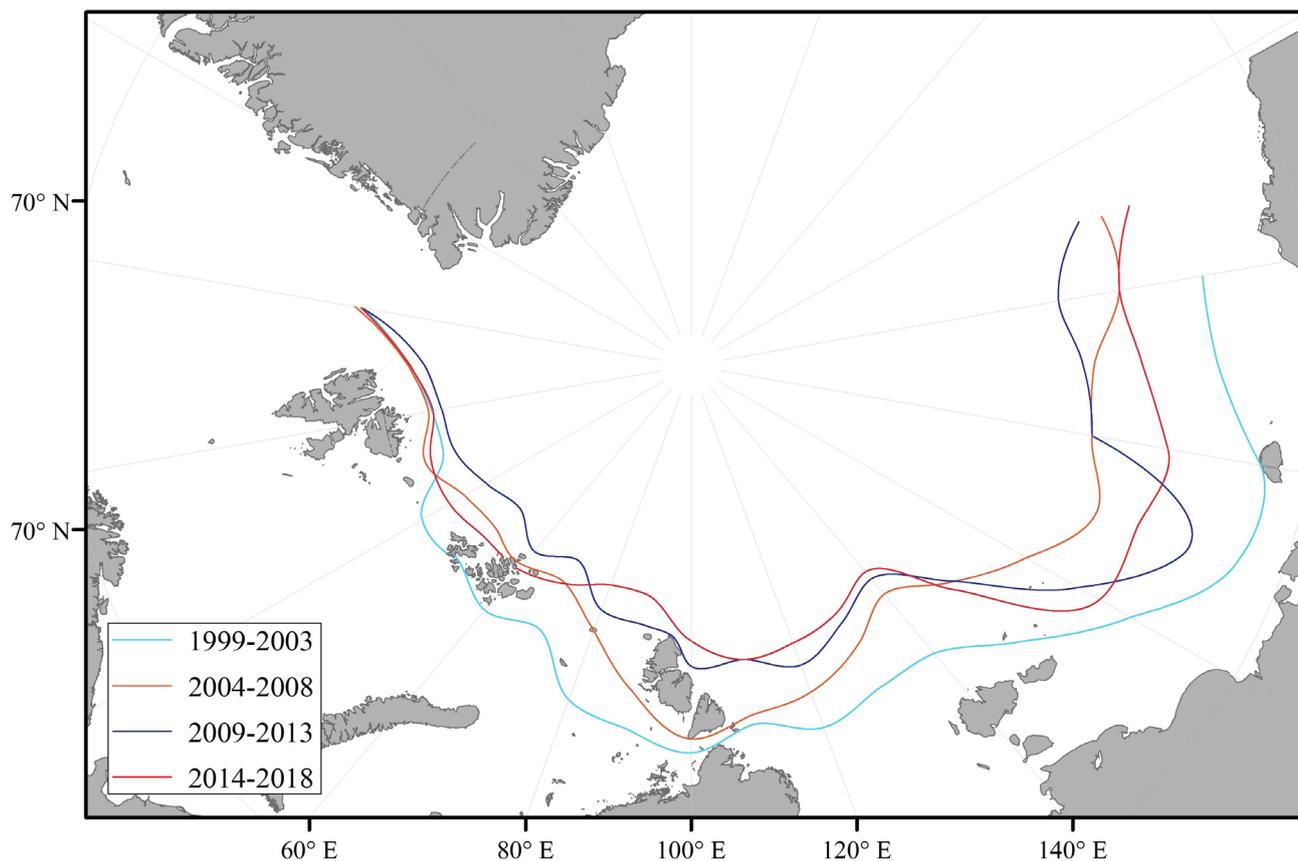


Рисунок 7 – Изменение положение границы дрейфующих льдов в СЛО в сентябре для четырех пятилетий за период 1999–2018 гг.: 1999–2003 гг. (бирюзовая линия), 2004–2008 гг. (оранжевая линия), 2009–2013 гг. (синяя линия) и 2014–2018 гг. (красная линия).

1999 по 2018 гг., исследуемый период был также разбит на четыре промежутка по 5 лет. Такая детализация позволила установить, как изменялось положение границы льдов внутри последнего двадцатилетнего периода. На рисунке 7 приведено положение границы дрейфующих льдов в конце летнего периода последовательно за пятилетия с 1999 по 2018 гг.

В первый пятилетний период 1999–2003 гг. смещение южной границы дрейфующих льдов было незначительным. Граница льдов устойчиво наблюдалась в северной части российских арктических морей. Однако в последующие пятилетия смещение границы льдов стало более существенным. Так, южная граница дрейфующих льдов в пятилетие 2004–2008 гг. существенно сместилась на север российских арктических морей и в море Бофорта. В 2009–2013 гг. граница льдов продолжила смещение на север и достигла своего экстремального положения во всех морях, кроме Восточно-Сибирского.

В последний выделенный пятилетний период 2014–2018 гг. наблюдались более сложные изменения. В этот период гра-

ница несколько опустилась в южном направлении в Баренцевом море, незначительно сместилась на север в морях Карском и Лаптевых и снова опустилась в южном направлении в восточной части Евразийско-аляскинского сектора СЛО.

Несмотря на это, общая тенденция к смещению южной границы старых и остаточных однолетних льдов к северу сохранялась. Граница дрейфующих льдов сместилась в северном направлении на 110–220 км и стала устойчиво наблюдаться в районе северных границ российских арктических морей.

Оценка отношения старых и однолетних льдов в общем составе льдов СЛО.

Вопрос о составе льдов в СЛО на момент их максимального накопления (апрель) вызывает большой интерес исследователей.

Так, старые льды в центральной части океана, у Гренландского и Североканадского побережья сохраняются после летнего таяния и переходят в новый цикл осенне-зимнего нарастания. Меж-

ду тем, в течение всего года и в летний сезон наблюдается сокращение некоторой части старых льдов в центральной части Арктического бассейна за счет их выноса в пролив Фрама, а также разрушения и замещения однолетними льдами. Поэтому основная часть старых льдов в СЛО носит условно постоянный характер.

Однолетние льды, особенно на акваториях арктических морей, от Баренцева моря до моря Бофорта, носят сезонный характер. Они появляются в осенний сезон ледообразования, нарастают в течение зимнего сезона, достигая значительных толщин (более 120 см, а в некоторых районах морей более 200 см), и полностью разрушаются в период летнего таяния. Только небольшая часть остаточных однолетних льдов, примыкающая к старым льдам в центральной части океана, может сохраняться до конца летнего сезона таяния, и после начала нового осеннего сезона пополнять количество старых льдов в океане. Роль остаточных однолетних льдов в СЛО очень велика, поскольку они являются основным поставщиком старых льдов.

До конца XX столетия в возрастном составе льдов преобладали старые льды. Переход к преобладанию однолетних льдов над старыми произошел в начале 2000-х гг. По некоторым оценкам это событие произошло в период 2002–2004 гг. [16, 17], согласно выводам других авторов — после 2004 г. [18]. Хотя все эти оценки получены экспертными методами или по результатам модельных расчетов, близость оценок скорее всего подтверждает их достоверность. Несколькостораживает короткий срок переходного периода, который составляет всего 1–2 года.

В последний климатический период было отмечено, что сокращение старых льдов и их замещение однолетними льдами в СЛО идет с возрастающей интенсивностью. Полученные целым рядом авторов оценки отношения старых и однолетних льдов показывают, что в настоящий момент времени в СЛО преобладают однолетние льды, составляющие от 60 до 70%. Часть старых льдов соответственно изменяется от 30 до 40% [12, 14, 16, 19].

Нами также была проведена эксперт-

ная оценка отношения старых и однолетних льдов в СЛО на момент максимального нарастания ледяного покрова (апрель) за ряд наблюдений 1978–2019 гг.

Площадь старых льдов, которые накапливаются в СЛО в апреле, оценивались из предположения, что они состоят из старых и остаточных однолетних льдов, сохранившихся в конце предшествующего летнего сезона таяния. Как уже упоминалось выше, остаточные однолетние льды, сохранившиеся после летнего таяния и вошедшие в новый цикл осенне-зимнего нарастания, после 1 января нового года становятся двухлетними льдами и, таким образом, пополняют количество старых льдов.

Следовательно, все льды, сохранившиеся после летнего таяния в сентябре (старые и остаточные однолетние), составят общее количество старых льдов, на момент их максимального накопления (в апреле). Единственным и очень важным условием этого предположения является обязательный учет выносимых льдов в пролив Фрама в результате дрейфа в осенне-зимний сезон (с сентября по апрель).

Общая площадь льдов, выносимых в среднем за месяц из центральной части Арктического бассейна в пролив Фрама, составляет около 67 тыс. км². Из них 40% составляют молодые и однолетние льды и 60% составляют старые льды [20]. Таким образом, за 7 месяцев с сентября по апрель площадь старых льдов в результате выноса в среднем уменьшается на 40 тыс. км² ежемесячно или на 280 тыс. км² за весь рассматриваемый осенне-зимний сезон. Отсюда следует, что площадь старых льдов в апреле будет равна площади старых и остаточных однолетних льдов в сентябре минус площадь старых льдов, вынесенных в пролив Фрама за период с сентября по апрель (280 тыс. км²). Доля молодых и однолетних льдов в СЛО в апреле составит разницу между общей площадью всех льдов в СЛО без площади старых льдов.

На рисунке 8 представлены кривые многолетнего хода изменения площадей старых и однолетних льдов в общей площади льда в СЛО в период максимального

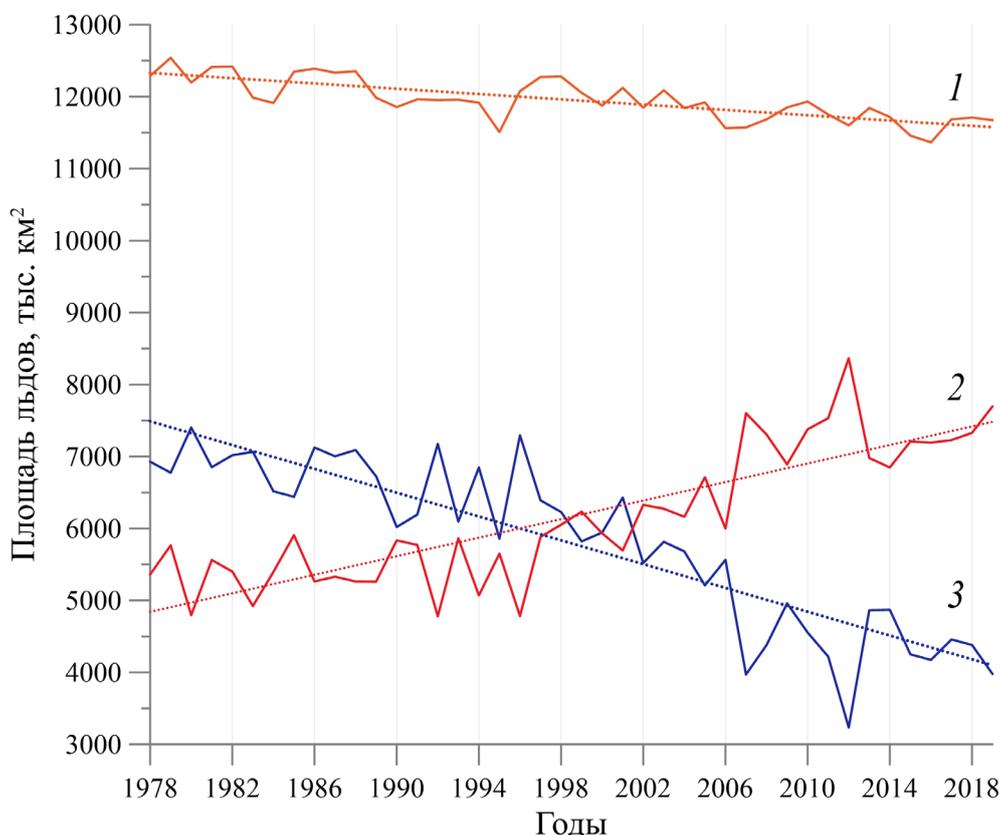


Рисунок 7 – Изменение положение границы дрейфующих льдов в СЛО в сентябре для четырех пятилетий за период 1999–2018 гг.: 1999–2003 гг. (бирюзовая линия), 2004–2008 гг. (оранжевая линия), 2009–2013 гг. (синяя линия) и 2014–2018 гг. (красная линия).

го накопления ледяного покрова (апрель). Ход кривых хорошо иллюстрирует тенденцию изменения доли старых и однолетних льдов в общем количестве льдов СЛО.

По ходу кривых можно выделить несколько характерных и важных периодов в развитии ледяного покрова СЛО:

- период до 1990 г., в котором наблюдается безусловное и значительное (до 2000 тыс. км²) преобладание старых льдов над однолетними,
- период с 1990 по 1997 гг., в течение которого также наблюдается преобладание старых льдов над молодыми, но величина этого преобладания значительно меньше (до 1000 тыс. км²),
- период с 1998 по 2001 гг., в течение которого наблюдается выравнивание количества старых и однолетних льдов в общем количестве льдов в СЛО,
- и, наконец, период с 2002 г. по настоящее время, в течение которого наблюдается устойчивое и все нарастающее преобладание однолетних льдов над старыми льдами.

Из приведенных данных следует, что, начиная с 2002 г., однолетние льды преоб-

ладают в СЛО, причем их преобладание носит нарастающий характер. В последнее пятилетие соотношение возрастного состава льдов между старыми и однолетними льдами в СЛО в конце зимнего сезона составляет примерно 37% и 63% соответственно.

Таким образом, в возрастном составе льдов СЛО наблюдаются кардинальные изменения. Если в период 1978–1997 гг. преобладали старые льды, то начиная с 2002 г., и по настоящее время преобладают однолетние и молодые льды, доля которых постоянно увеличивается. В настоящее время происходит постоянное и все нарастающее замещение старых льдов однолетними льдами. Это означает, что при сохранении нынешней тенденции, ледяной покров СЛО в скором времени может действительно стать сезонным как предполагают ряд авторов [16, 19].

Заключение

Проведенный анализ положения южной границы старых льдов за последние 20 лет показал, что наблюдается устойчивая тенденция смещения границы к северу. Это смещение менее выражено в за-

падной части Евразийско-аляскинского сектора СЛО (здесь оно составляет от 0 до 110 км) и более выражено в восточной части (от 300 до 550 км). На акватории СЛО, на которой ранее наблюдались старые льды, произошло их замещение однолетними льдами.

Проведенный анализ положения южной границы дрейфующих льдов (старых и остаточных однолетних) в сентябре за последние 20 лет показал, что наблюдаются устойчивая тенденция смещения границы к северу. Граница дрейфующих льдов сместилась в северном направлении на 110–220 км и стала устойчиво наблюдаться в районе северных границ российских арктических морей. Акватория СЛО, на которой ранее в летний период постоянно наблюдались дрейфующие льды, в два последних десятилетия полностью очищается ото льдов.

В возрастном составе льдов СЛО произошли кардинальные изменения. Если в период 1978–1997 гг. на момент максимального накопления льда (апрель) преобладали старые льды, то начиная с 2002 г. и по настоящее время наблюдается устойчивое преобладание однолетних и молодых льдов, количество которых постоянно увеличивается. В последнее пятилетие соотношение между старыми и однолетними льдами в СЛО в конце зимнего сезона составляет примерно 37% и 63% соответственно.

Полученные данные могут быть полезными для последующего сравнительного анализа состояния и распределения старых и однолетних льдов на акватории СЛО.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-60109.

Список литературы:

1. Смирнов В.Г., Бушуев А.В., Бычкова И.А., Захваткина Н.Ю., Лошилов В.С. Спутниковый мониторинг морских льдов // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 85. № 2. С. 62–76.
2. Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей: практическое пособие / Под ред. В.Г. Смирнова. СПб.: Изд-во ААНИИ, 2011. 240 с.
3. Афанасьева Е.В., Алексеева Т.А., Соколова Ю.В., Демчев Д.М., Чуфарова М.С., Быченков Ю.Д., Девятаев О.С. Методика составления ледовых карт ААНИИ // Российская Арктика. 2019. Т. 7. С. 5–20.
4. Международная символика для ледовых морских карт и номенклатура морских льдов. Л.: Гидрометеиздат, 1984, с. 56.
5. Гудкович З.М., Кириллов А.А., Ковалев Е.Г., Сметанников А.В., Спичкин В.А. Основы методов долгосрочных прогнозов для арктических морей. Л.: Гидрометеиздат, 1972, с. 348.
6. Юлин А.В., Шаратунова М.В. Долгосрочный прогноз площади остаточных льдов в сентябре в Северном Ледовитом океане // Российская Арктика. 2018. № 2. С. 4–14.
7. Спичкин В.А., Тюряков А.Б., Юлин А.В. Характерные особенности осеннего ледообразования в морях сибирского шельфа // Труды ААНИИ. 1987. Т. 402. С. 103–121.
8. Архив обзорных ледовых карт Северного Ледовитого Океана на официальном сайте ААНИИ. URL: <http://www.aari.ru/projects/ECIMO/index.php> (дата обращения: 25.05.2020).
9. Информационные материалы по мониторингу морского ледяного покрова Арктики и Южного Океана на основе данных ледового картирования и пассивного микроволнового зондирования ледового картирования и пассивного микроволнового зондирования SSMR–SSM/I–SSMIS–AMSR2. URL: <http://wdc.aari.ru/resources/d0042> (дата обращения: 11.10.2019).
10. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М. Научные исследования в Арктике, т. 2, Климатические изменения ледяного покрова морей Евразийского шельфа. СПб: «Наука», 2007, 136 с.
11. Алексеев Г.В., Александров Е.И., Глок Н.И., Иванов Н.Е., Харланенкова Н.Е., Юлин А.В. Эволюция площади морского ледяного покрова Арктики в условиях современных изменений климата // Исследование Земли из космоса. 2015. № 2. С. 5–19.
12. 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.
13. Гудкович З.М., Карклин В.П., Миронов Е.У., Иванов В.В., Лосев С.М., Дымент Л.Н., Смоляницкий В.М., Фролов С.В., Юлин А.В., Усольцева Е.А. Развитие ледовых и метеорологических условий в Арктике в период 2007–2013 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. Т. 96. № 2. С. 90–103.
14. 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 Антар-

- ктики. СПб, 2019, том 65, № 3, с. 328-340. DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-328-340
15. Третьяков В.Ю., Сарафанов М.И., Фролов С.В. Межгодовая изменчивость ледовых условий плавания в морях Российской Арктики // Арктика: общество, наука и право: сб. статей / под ред. Н. К. Харламповеой. — СПб: С.-Петербур. гос. ун-т, 2020. С. 334-339
 16. Kwok R., Cunningham G.F., Wensnahan M., Rigor I., Zwally H.J., Yi D. Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003–2008 // *Journal of Geophysical Research*. 2009. Vol. 114. № C07005.
 17. Stroeve J.C., Serreze M.C., Holland M.M., Kay J.E., Malanik J., Barrett A.P. The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis // *Climatic Change*. 2011. Vol. 110. P. 1005–1027.
 18. Алексеев Г.В., Данилов А.И., Катцов В.М., Кузьмина С.И., Иванов Н.Е. 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.
 19. Иванов В. В., Алексеев В. А., Алексеева Т. А., Колдунов Н. В., Репина И. А., Смирнов А. В. Арктический ледяной покров становится сезонным? // *Исследование Земли из космоса*. 2013. № 4. С. 50–65.
 20. Егорова Е.С., Виноградная Е.С. Оценка дрейфа льда через пролив Фрама по результатам различных моделей // *Комплексные исследования Мирового океана. Материалы V Всероссийской научной конференции молодых ученых, г. Калининград, 18–22 мая 2020 г. (принята в печать)*.

References:

1. Smirnov V.G., Bushuev A.V., Bychkova I.A., Zahvatkina N.YU., Loshchilov V.S. Sputnikovyy monitoring morskikh l'dov [Satellite monitoring of the sea ice]. *Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research]*, 2019, vol. 85, no. 2, pp. 62–76. (In Russian).
2. Sputnikovye metody opredeleniya harakteristik ledyanogo pokrova morej [Satellite methods for determining the ice sea cover characteristics]. SPb.: Izd-vo AANII, 2011, 240 p. (In Russian).
3. Afanas'eva E.V., Alekseeva T.A., Sokolova YU.V., Demchev D.M., Chufarova M.S., Bychenkov YU.D., Devyataev O.S. Metodika sostavleniya ledovykh kart AANII [AARI methodology for sea ice charts composition]. *Rossiyskaya Arktika [Russian Arctic]*, 2019, vol. 7, pp. 5–20. (In Russian).
4. Mezhdunarodnaya simvolika dlya ledovykh morskikh kart i nomenklatura morskikh l'dov [International symbols on sea ice charts and sea ice nomenclature]. L.: Gidrometeoizdat, 1984, 56 p. (In Russian).
5. Gudkovich Z.M., Kirillov A.A., Kovalev E.G., Smetannikov A.V., Spichkin V.A. Osnovy metodov dolgosrochnykh prognozov dlya arkticheskikh morej [Basics of long-term forecasting methods for the Arctic seas]. L.: Gidrometeoizdat, 1972, 348 p. (In Russian).
6. Yulin A.V., Sharatunova M.V. Dolgosrochnyy prognoz ploshchadi ostatochnykh l'dov v sentyabre v Severnom Ledovitom okeane [Long-range forecast of residual ice area in the Arctic Ocean in September]. *Rossiyskaya Arktika [Russian Arctic]*, 2018, vol. 2, pp. 4–14. (In Russian).
7. 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*. СПб, 2019, том 65, № 3, с. 328-340. DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-328-340
8. Третьяков В.Ю., Сарафанов М.И., Фролов С.В. Межгодовая изменчивость ледовых условий плавания в морях Российской Арктики // *Арктика: общество, наука и право: сб. статей / под ред. Н. К. Харламповеой*. — СПб: С.-Петербур. гос. ун-т, 2020. С. 334-339
9. Spichkin V.A., Tyuryakov A.B., Yulin A.V. Harakternye osobennosti osennego ledoobrazovaniya v moryah sibirskogo shel'fa [Special features of autumn ice formation in the seas of the Siberian shelf]. *Trudy AANII [Proc. of AARI]*, 1987, vol. 402, pp. 103–121. (In Russian).
10. Arhiv obzornykh ledovykh kart Severnogo Ledovitogo Okeana na oficial'nom sajte AANII [Arctic overview ice charts archive available through the AARI official web-site]. (In Russian) Available at: <http://www.aari.ru/projects/ECIMO/index.php> (accessed 25.05.2020).
11. Informacionnye materialy po monitoringu morskogo ledyanogo pokrova Arktiki i YUzhnogo Okeana na osnove dannykh ledovogo kartirovaniya i passivnogo mikrovolnovogo zondirovaniya ledovogo kartirovaniya i passivnogo mikrovolnovogo zondirovaniya SSMR–SSM/I–SSMIS–AMSR2 [Monitoring of the Arctic and Southern Ocean sea ice cover on the basis of ice charting and SSMR-SSM/I-SSMIS-AMSR2 passive microwave information]. (In Russian). Available at: <http://wdc.aari.ru/resources/d0042/> (accessed 11.10.2019).
12. 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.
13. Alekseev G.V., Aleksandrov E.I., Glok N.I., Ivanov

E.S. Vinogradnyaya, E.S. Egorova, T.V. Sheveleva, A.V. Yulin

VARIABILITY OF THE SPRING OLD ICE AND FALL RESIDUAL ICE BOUNDARY IN THE ARCTIC OCEAN OVER THE CURRENT PERIOD OF CLIMATE CHANGES

- N.E., Harlanenkova N.E., Yulin A.V. Evolyuciya ploshchadi morskogo ledyanogo pokrova Arktiki v usloviyah sovremennyh izmenenij klimata [Arctic Sea Ice Cover in Connection with Climate Change]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Earth exploration from space], 2015, no. 2, pp. 5–19. (In Russian).
14. Yulin A.V., Vyazigina N.A., Egorova E.S. Mezhgodovaya i sezonnaya izmenchivost' ploshchadi l'dov v Severnom Ledovitom okeane po dannym sputnikovoyh nablyudenij [Interannual and seasonal variability of Arctic sea ice extent according to satellite observations]. *Rossijskaya Arktika* [Russian Arctic], 2019, no. 7, pp. 28–41. (In Russian).
 15. Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Mironov E.U., Ivanov V.V., Losev S.M., Dymont L.N., Smolyanickij V.M., Frolov S.V., YULIN A.V., Usol'ceva E.A. Razvitie ledovyh i meteorologicheskikh uslovij v Arktike v period 2007–2013 gg. [Development of ice and weather conditions in the Arctic during 2007–2013]. *Problemy Arktiki i Antarktiki* [Arctic and Antarctic Research], 2013, vol. 96, no. 2, pp. 90–103. (In Russian).
 16. Kwok R., Cunningham G.F., Wensnahan M., Rigor I., Zwally H.J., Yi D. Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003–2008. *Journal of Geophysical Research*, 2009, vol. 114, № C07005.
 17. Stroeve J.C., Serreze M.C., Holland M.M., Kay J.E., Malanik J., Barrett A.P. The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis. *Climatic Change*, 2011, vol. 110, pp. 1005–1027.
 18. Alekseev G.V., Danilov A.I., Katcov V.M., Kuz'mina S.I., Ivanov N.E. Izmeneniya ploshchadi morskikh l'dov Severnogo polushariya v XX i XXI vekah po dannym nablyudenij i modelirovaniya [Changes in the Climate and Sea Ice of the Northern Hemisphere in the 20th and 21st Centuries from Data of Observations and Modeling]. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics], 2009, vol. 45, no. 6, pp. 723–735. (In Russian).
 19. Ivanov V. V., Alekseev V. A., Alekseeva T. A., Koldunov N. V., Repina I. A., Smirnov A. V. Arkticheskij ledyanoj pokrov stanovitsya sezonnym? [Does Arctic Ocean Ice Cover Become Seasonal?]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Earth exploration from space], 2013, no. 4, pp. 50–65. (In Russian).
 20. Egorova E.S., Vinogradnyaya E.S. Ocenka drejfa l'da cherez proliv Fram po rezul'tatam razlichnyh modelej [Sea ice drift estimation via the Fram Strait using the outcomes of various methods]. *Materialy V Vserossijskoj nauchnoj konferencii molodyh uchenyh «Kompleksnye issledovaniya Mirovogo okeana* [Proc. of V All-Russian Scientific Conference of young researchers «Global Ocean integrated exploration»]. Kaliningrad, 18–22 of May, 2020. (in print). (In Russian).