

УДК 551.467

*А.В. Юлин, М.В. Шаратунова*

Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

*A.V. Yulin, M.V. Sharatunova*

Arctic and Antarctic research institute, Saint-Petersburg

[icefore@mail.ru](mailto:icefore@mail.ru), [mvsh@aari.ru](mailto:mvsh@aari.ru)

## **ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ПЛОЩАДИ ОСТАТОЧНЫХ ЛЬДОВ В СЕНТЯБРЕ В СЕВЕРНОМ ЛЕДОВИТОМ ОКЕАНЕ.**

### **Long-range forecast of residual ice area in the Arctic Ocean in September**

*Аннотация. В статье рассматривается возможность долгосрочного (с заблаговременностью от 5 до 8 месяцев) прогнозирования площади остаточных льдов в сентябре, которые сохранятся в Северном Ледовитом океане после периода летнего таяния. Это важный показатель, характеризующий предстоящую сложность навигационной обстановки в морях российской Арктики. Результаты прогноза позволяют планировать морские операции на трассе СМП, а также оценивать состояние климатической системы атмосфера-лед-океан на предстоящий летний сезон.*

*Abstract. The opportunity of long term forecasting (5-8 months in advance) the area of residual ice which remains in the Arctic ocean in September after the summer melting is discussed in the paper. It is an important indicator which characterizes the expected difficulty of the navigation conditions in the Russian Arctic. The results of the forecast allow planning the marine activity at the North Sea Route as well as assessing the state of the climatic system "atmosphere – ice – ocean" in the next summer.*

Ключевые слова: Северный Ледовитый океан, ледовый режим, площадь остаточных льдов, долгосрочные ледовые прогнозы

Key words: Arctic Ocean, ice regime, area of residual ice, long-range forecasts

*Введение.* Изменчивость площади льдов в Северном Ледовитом океане (СЛО) вызывает большой интерес у исследователей по целому ряду причин.

Во-первых, площадь льдов в Северном Ледовитом океане является наиболее доступным и информативным показателем состояния климатической системы «атмосфера-лед-океан» и происходящих в этой системе изменений [1].

Во-вторых, очень важным является прикладное значение этого показателя. Чем больше льдов исчезнет в результате летнего таяния, тем более обширные акватории океана и его морей очистятся ото льда, что будет способствовать судоходству. Например, если площадь остаточных льдов в сентябре составляет менее 5 млн км<sup>2</sup>, то это означает, что ледяной покров интенсивно разрушался в течение летнего периода и акватория российских арктических морей будет полностью свободна ото льда (рис. 1а). Если площадь остаточных льдов в сентябре более 5 млн км<sup>2</sup>, то на акватории некоторых арктических морей будет сохраняться ледяной покров, что негативно отразится на возможности и безопасности плавания судов (рис. 1б). Если в течение летнего периода разрушение и таяние ледяного покрова происходило с низкой интенсивностью, то площадь остаточного льда в сентябре будет более 7 млн км<sup>2</sup> и плавание судов по трассе СМП будет происходить в очень сложных ледовых условиях.

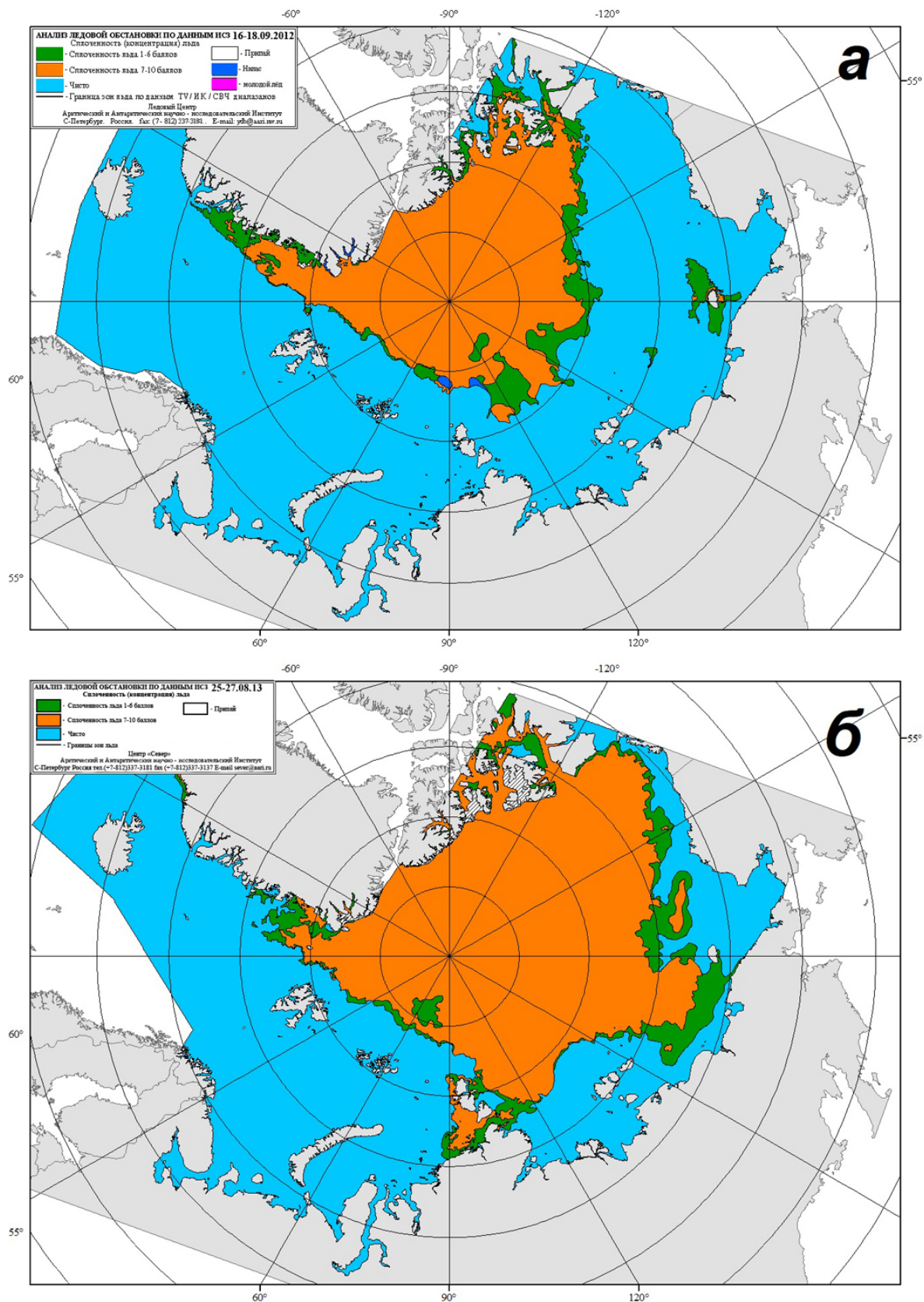


Рисунок 1 - Распределение льда в середине сентября в 2012 г (а, площадь остаточных льдов 3,5 млн км<sup>2</sup>) и в 2013 г. (б, площадь остаточных льдов 5,2 млн км<sup>2</sup>) (www.aari.ru)

*Сезонная изменчивость ледяного покрова.* Начиная с конца 70-х годов прошлого века, спутниковая информация о состоянии ледяного покрова оперативно поступает в распоряжение специалистов, которая оценивается с большой точностью и дискретностью (с частотой не менее 1 суток).

В сезонном ходе изменения площади льда в СЛО хорошо прослеживаются два противоположных процесса: осенне-зимнее увеличение площади льдов в результате ледообразования и летнее уменьшение площади льдов в результате таяния. На рисунке 2, приведенном ниже, показан среднесезонный сезонный ход изменения площади льдов в СЛО за ряд наблюдений с 1979 по 2018 гг., а также его минимальные и максимальные значения (данные архива Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ)

<http://wdc.aari.ru/datasets/ssmi/data/north/extent/>).

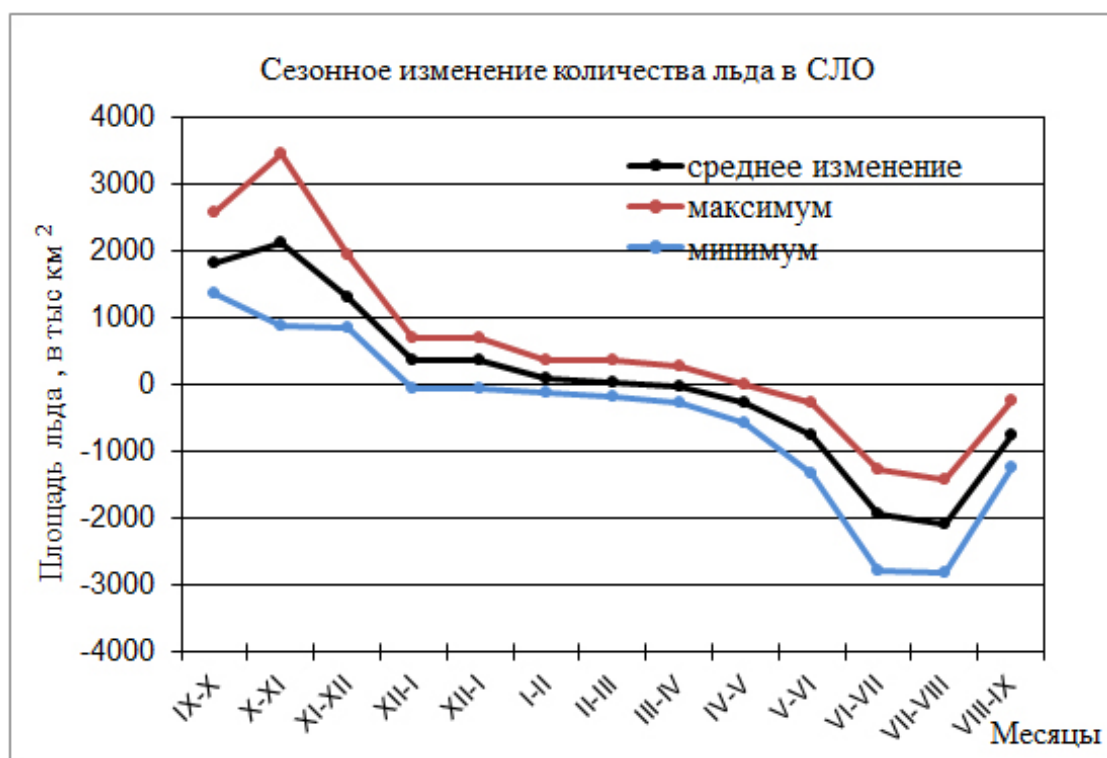


Рисунок 2 - Сезонное изменение количества льдов в Северном Ледовитом океане

Из приведенного рисунка видно, что в осенний период, начиная с сентября, происходит интенсивное нарастание площади льдов. С сентября по ноябрь площадь ледяного покрова увеличивается в среднем на 2,0 млн км<sup>2</sup> в месяц. С ноября по декабрь интенсивность нарастания площади льдов уменьшается до 1,3 млн км<sup>2</sup>. Всего же за осенние месяцы до конца года в среднем появляется до 85% вновь образованных льдов. За оставшиеся зимние месяцы до апреля площадь льдов увеличивается только на 15%, несмотря на период самых низких температур. В апреле увеличение площади льдов прекращается.

Таким образом, в осенний период года с сентября по декабрь происходит основное увеличение площади льдов в СЛО. Это молодые и однолетние льды осенне-зимнего образования. В оставшиеся зимние месяцы с января по апрель увеличение площади льдов уже незначительно, но именно в этот период продолжается интенсивное нарастание толщины этих льдов.

В течение апреля-мая начинается уменьшение площади льдов в результате летнего таяния, которое продолжается до середины сентября. Остаточная площадь льдов в СЛО в сентябре характеризует интенсивность летних процессов таяния. В среднем за летний период разрушается и тает около 5,8 млн км<sup>2</sup>. В середине сентября в СЛО сохраняются остаточные льды, площадь которых в среднем (за весь ряд наблюдений с 1979 по 2017 гг.) составляет около 6,1 млн км<sup>2</sup>.

*Межгодовая изменчивость ледяного покрова.* Необходимо отметить, что в динамике летнего таяния и разрушения льдов за последние два десятилетия произошли существенные изменения. Сравнение остаточной площади льдов в СЛО в сентябре за последнее десятилетие 2008-2017 гг. с данными за более холодное десятилетие 1978-1986 гг. показывает, что наблюдается уменьшение количества остаточных льдов в сентябре в среднем с 7,2 до 4,7 млн км<sup>2</sup>. То есть в Северном Ледовитом океане в последнее десятилетие после летнего таяния стало оставаться меньше льдов в среднем на 2,5 млн км<sup>2</sup>. Гигантские акватории

океана и его морей, которые еще три десятка лет назад были покрыты льдом в сентябре, сейчас полностью очищаются ото льда.

На рисунке 3 представлен межгодовой ход площадей льдов в СЛО в декабре предшествующего года и в сентябре текущего года (данные архива ААНИИ <http://wdc.aari.ru/datasets/ssmi/data/north/extent/>). Из данных, приведенных на рисунке, хорошо прослеживается тенденция сокращения остаточной площади льдов, наблюдаемая в последние два десятилетия.

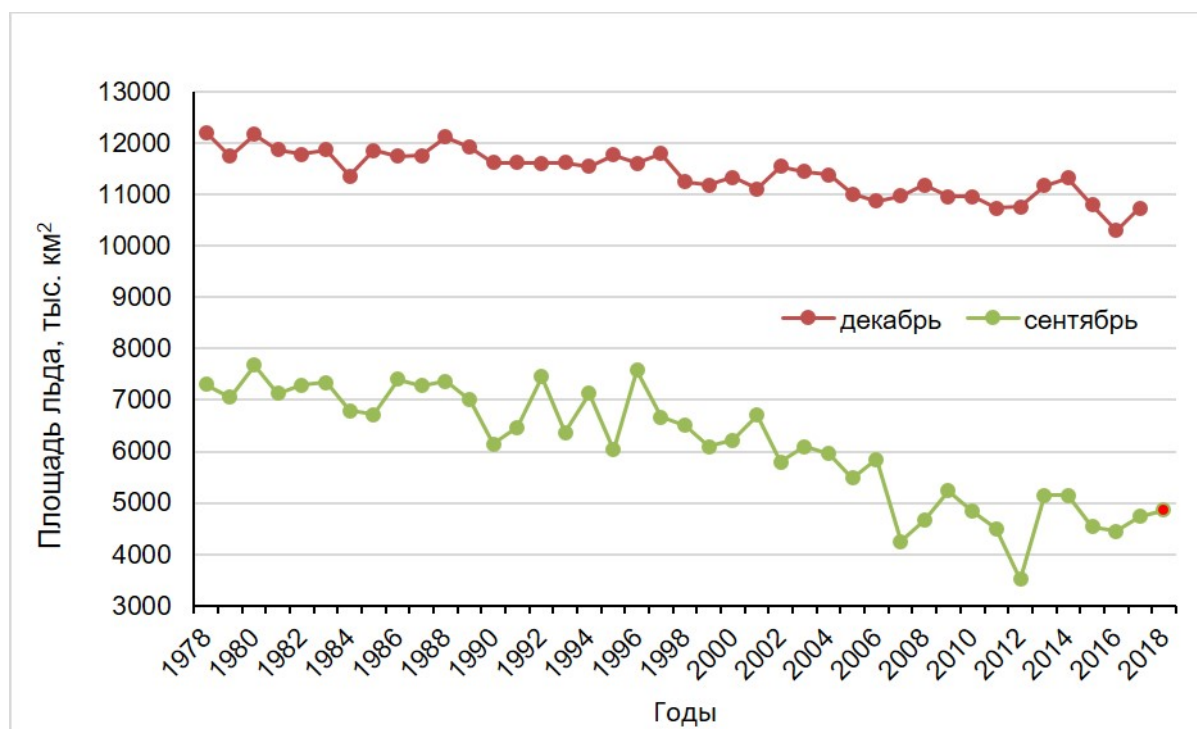


Рисунок 3 - Межгодовой ход площади льдов в СЛО в декабре и сентябре (красная точка – прогноз на сентябрь 2018 г)

Очищение больших акваторий ледовитых морей и увеличение длительности безледного периода существенно снижает зависимость от ледяного покрова хозяйственной деятельности различных направлений: плавания судов и перевозки грузов, разведки и добычи минерального сырья в шельфовых районах, экспедиционных исследований, операций ВМФ [2].

Таким образом, становится очевидным важность мониторинга изменения площади ледяного покрова и его прогноза.

*Прогноз площади остаточных льдов.* В отделе ледового режима и прогнозов ААНИИ в результате изучения взаимосвязи накопления льда в

зимний период года с последующим его сокращением в летний период было установлено, что существует хорошая зависимость между интенсивностью осенне-зимнего накопления льда в СЛО и его последующего таяния. Величина коэффициента корреляции (КК) площади льда в декабре предшествующего года с площадью льда в сентябре текущего года для ряда наблюдений в 39 лет составила 0,84. Величина R площади ледяного покрова в марте (период максимального накопления льда) составила 0,81. Это значимые и очень большие значения коэффициентов корреляции, доказывающие неслучайный характер связи.

Прогнозирование природных процессов с большой временной заблаговременностью, составляющей от 1 до 6 месяцев, является сложной исследовательской задачей. Научно обоснованный прогноз с большой заблаговременностью возможен только в том случае, если есть правильное понимание природы формирования прогнозируемого явления и определены формирующие его факторы, установлены надежные и информативные предикторы.

Физический механизм связи сроков начала осеннего ледообразования, интенсивности накопления льда в зимний период и последующего летнего разрушения, в принципе, понятен. Раннее и интенсивное накопление льда в СЛО, нарастание его толщины и торосистости приводит к формированию большого количества мощных льдов. Позднее начало ледообразования и низкая интенсивность нарастания льда приводит к формированию ледяного покрова гораздо меньшей мощности. В свою очередь, чем больше мощных льдов (по количеству и толщине) появляется на акватории морей океана к концу периода нарастания, тем больше их остается после летнего таяния.

Выявленные зависимости между площадями льдов в различные сезоны года и установленные ранее взаимосвязи изменчивости площади льдов с крупномасштабными показателями температуры воздуха и воздушных переносов позволяют использовать их для построения прогностической модели.

На основе автоматизированной прогностической системы «Пегас» (АПС «Пегас»), разработанной в ААНИИ и успешно используемой в оперативной практике, была построена прогностическая модель, позволяющая оценивать площадь остаточного льда в СЛО в сентябре [2].

Основным назначением АПС "Пегас" является исследование информативности различных гидрометеорологических полей, построение расчетных и прогностических моделей. Она позволяет оценивать статистическую связь между показателями метеорологического и ледового режима, по заданному критерию выбирать наиболее информативные данные, проводить обобщение всей информации и строить линейную прогностическую модель.

В качестве исходных данных в модели прогноза площади остаточных льдов в сентябре используются основные показатели состояния ледяного покрова, воздушных переносов и крупномасштабные показатели температуры воздуха, приведенные в таблице 1. По приведенным в таблице частным коэффициентам корреляции видно, что наиболее информативными для прогноза являются площади льдов в предшествующие периоды формирования ледяного покрова и температура воздуха в осенне-зимний период.

Таблица 1 – Даты разработки и исходные данные для прогноза остаточной ледовитости СЛО в сентябре

<b>Дата составления прогноза</b>	<b>Вид прогноза</b>	<b>Заблаговременность прогноза</b>	<b>Исходные данные</b>	<b>R</b>
1 декада января	Предварительный прогноз	8 месяцев сверхдолгосрочный	Ледовитость СЛО в декабре	0,83
			Среднегодовая температура воздуха	-0.82
			Поля давления IX-XII	0,32-0,51
1 декада апреля	Уточнение предварительного прогноза	5 месяцев долгосрочный	Ледовитость СЛО в марте	0,81
			Средняя температура воздуха за осенне-зимний период	-0,80
			Поля давления IX-III	0,32-0,55

Технология прогноза площади остаточного льда в СЛО в сентябре основана на двух этапах – предварительном прогнозе и основном прогнозе. В предварительном прогнозе, составляемом в первой декаде января, заблаговременностью 8 месяцев, учитываются осенние процессы накопления льда предшествующего года по декабрь включительно. В основном прогнозе, составляемом в первой декаде апреля, заблаговременностью 5 месяцев, учитываются осенне-зимние процессы накопления льда в СЛО на период максимального накопления ледяного покрова, которое наблюдается в конце марта - начале апреля.

Оправдываемость ретроспективных расчетов для предварительного прогноза составляет 88% (при допустимой ошибке для сверхдолгосрочных прогнозов равной  $\pm 1,0 \sigma$ ) и для основного прогноза 92 % (при допустимой ошибке для долгосрочных прогнозов равной  $\pm 0,8 \sigma$ ).

На сентябрь 2018 г. был составлен предварительный прогноз в начале января и основной прогноз в начале апреля. Результаты прогноза приведены в таблице 2. По результатам мониторинга ледяного покрова в конце сентября 2018 г. прогноз будет проверен на успешность.

Таблица 2 – Основные результаты прогноза площади остаточного льда в СЛО в сентябре 2018 г.

<b>Вид прогноза и дата составления</b>	<b>Сверхдолгосрочный, заблаговременность 8 месяцев</b>	<b>Долгосрочный, заблаговременность 5 месяцев</b>	<b>Климатический (по норме)</b>
<b>Дата разработки</b>	10 января	10 апреля	10 января, 10 апреля
<b>КК результирующего уравнения</b>	0,88	0,92	
<b>Прогноз площади остаточного льда в сентябре 2018 г.</b>	<b>4680 тыс. км<sup>2</sup></b>	<b>4850 тыс. км<sup>2</sup></b>	6150 тыс. км <sup>2</sup>
<b>Норма полного ряда с 1979-2017 гг. (39 лет)</b>	6150 тыс. км <sup>2</sup>	6150 тыс. км <sup>2</sup>	6150 тыс. км <sup>2</sup>
<b>Аномалия по длинному ряду</b>	- 1470 тыс. км <sup>2</sup>	- 1300 тыс. км <sup>2</sup>	0
<b>Норма короткого</b>	4670 тыс. км <sup>2</sup>	4670 тыс. км <sup>2</sup>	4670 тыс. км <sup>2</sup>

ряда с 2008-2017 гг. (10 лет)			
<b>Аномалия по короткому ряду</b>	+10 тыс. км <sup>2</sup>	+ 120 тыс. км <sup>2</sup>	+1480 тыс. км <sup>2</sup>

*Выводы.* По разработанному прогнозу ожидается, что площадь остаточных льдов в СЛО в сентябре 2018 г. составит 4850 тыс. км<sup>2</sup>. Это меньше среднемноголетнего значения за полный ряд наблюдений с 1979-2017 гг. (39 лет) на 1300 тыс. км<sup>2</sup> или на величину  $-1,18\sigma$ , которая показывает, что аномалия площади остаточных льдов относится к крупной отрицательной аномалии. Однако, если рассмотреть изменения площади остаточных льдов в сентябре за последнее теплое десятилетие (с 2008-2017 гг.), то выявляется интересная особенность. Становится очевидным, что после аномального сокращения площади остаточных льдов, которое наблюдалось в сентябре 2012 г. и составило 3346 тыс. км<sup>2</sup>, площадь остаточных льдов начинает медленно повышаться (см. рис. 3 нижняя кривая).

По разработанному прогнозу ожидается, что площадь остаточных льдов в сентябре 2018 г. превысит на 230 тыс. км<sup>2</sup> величину площади льдов предыдущего 2017 г., а также на 120 тыс. км<sup>2</sup> превысит норму ряда наблюдений за последнее десятилетие с 2008-2017 гг.

Таким образом, прогноз на сентябрь 2018 г. продолжает «климатическую паузу» в изменении площади льдов в СЛО, которая наблюдается в последние пять лет.

Значительных изменений в площади остаточных льдов в сентябре, которые смогли бы объективно и однозначно подтвердить одну из двух существующих ключевых гипотез ожидаемого изменения климата – необратимость и нарастание потепления или циклический характер изменений в 2018 г., не ожидается.

### *Список литературы*

1. 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.
2. Карклин В.П., Юлин А.В., Карелин И.Д., Иванов В.В. Климатические колебания ледовитости арктических морей сибирского шельфа // Труды ААНИИ. 2001. Т. 443. С. 5 – 11.
3. Юлин А.В. Автоматизированный программный комплекс по обработке и обобщению гидрометеоинформации, используемой в системе "Пегас" // Труды ААНИИ, т. 418, 1990, с. 25-36.

#### Literature

1. Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Kovalev E.G. Smolyanitsky V. M. Climate Change in Eurasian Arctic Shelf Seas. Centennial Ice Cover Observations. V. 2, Climate Change of ice cover extent in Eurasian Arctic Shelf Seas. Saint-Petersburg: Nauka, 2007: 136 p.
2. Karklin V.P., Yulin A.V., Karelin I.D., Ivanov V.V. Climatic fluctuations of ice cover extent in the Siberian shelf Arctic seas. Proc. AARI, 2001, vol. 443, p. 05-11.
3. Yulin A.V. Automated program complex for the information processing and generalization used in the PEGAS system. Proc. AARI, 1990, vol. 418, p. 25-36.