

## РОЛЬ АРКТИЧЕСКИХ ЗАПРИПАЙНЫХ ПОЛЫНЕЙ В ГЕНЕЗИСЕ НОВЫХ ЛЬДОВ В МОРЯХ СИБИРСКОГО ШЕЛЬФА И РАСПРЕСНЕНИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА

канд. геогр. наук А.В.ПОПОВ,  
канд. геогр. наук И.Д.КАРЕЛИН

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: a\_porov@aan.i.nw.ru

*В статье на основании методик Зубова, Сабинина и Кавальери получены оценки ежесуточного приращения льда во всех заприпайных полыньях (ЗП) морей Сибирского шельфа (МСШ). Выполнены расчеты «эффективных» толщин льда для каждой из исследуемых полыней. Интегрируя значения «эффективных» толщин льда по пространству полыней, получены оценки объемов льдов, продуцируемых в заприпайных полыньях каждого из морей Сибирского шельфа. Выполнена оценка объемов пресной воды, аккумулированной в новых льдах, образованных в заприпайных полыньях.*

*Получены временные ряды объема льдов, формирующихся ежегодно в полыньях МСШ. Выполнено сравнение оценок, полученных нами по различным методикам, с уже имеющимися данными. Приведены оценки объемов пресных вод, аккумулированных во льдах, и выполнено сопоставление со стоком рек в каждое из исследуемых морей. Объем пресных вод, аккумулированный во льдах, образованных во всех полыньях Карского моря за ноябрь–май, составляет от 9 до 64 % от среднемноголетнего суммарного годового стока рек в это море. Объем пресных вод, аккумулированный во льдах, образованных в полыньях моря Лаптевых за ноябрь–май, составляет от 6 до 107 % от среднемноголетнего суммарного годового стока рек в это море, при среднем значении 49%. Объем пресных вод, аккумулированный во льдах, образованных в полыньях Восточно-Сибирского моря за ноябрь–май, составляет 0,3–115 % от среднемноголетнего суммарного годового стока рек в это море, при среднем значении 33 %.*

*Величины повторяемости эпизодов существования полыней возросли от 30–70 % до 80–100 %, а площадь многих полыней возросла в 2–5 раз. В соответствии с этим увеличились и объемы льдов, образующихся в ЗП. Причем возрастание объема льдов за счет увеличения площадей полыней значительно превышает влияние повышенных температур воздуха, наблюдаемых в период потепления в Арктике.*

*Ключевые слова:* заприпайные полыньи, морской лед, пресноводный баланс, ежесуточное приращение льда, эффективная толщина, аккумуляция пресной воды, Северный Ледовитый океан, Гренландское море, Северная Атлантика, изменения климата.

В последние два года в рамках экспедиций по Программе Международного полярного года в Северном Ледовитом океане выполнены многочисленные наблюдения термохалинной структуры. Анализ материалов наблюдений свидетельствует о том, что в летний период 2007–2008 гг. в поверхностном слое Арктического бассейна (АБ) наблюдалось значительное распреснение вод. Аномалии солености достигали 3 ‰ в области ядер распреснения. Вариации приходной и расходной частей баланса пресных вод Северного Ледовитого океана (СЛО) в значительной степени определяют многолетние колебания многих элементов климатической системы [1, 4–6]. В многочисленных работах по исследованию пресноводного баланса СЛО и его отдельных морей [1, 5, 8–10, 19, 21] показано, что наиболее значимыми составляющими баланса являются сток рек и продукция льда в МСШ.

Основным источником новых льдов для Арктического бассейна являются окраинные арктические моря. Как показал В.Ф.Захаров [4], до 70 % объема но-

вых льдов МСШ продуцируются в заприпайных полыньях соответствующих морей. Выводы Ю.Ф.Захарова относятся к 60–70-м гг. XX в., когда повторяемость и площади полыней в МСШ были минимальны. От 70-х гг. XX в. к середине первой декады XXI в. величины повторяемости эпизодов существования полыней возросли от 30–70 % до 80–100 % [12–17, 27–28], а площадь многих полыней возросла в 2–5 раз. В соответствии с этим увеличились и объемы льдов, образующихся в ЗП. Причем возрастание объема льдов за счет увеличения площадей полыней значительно превышает влияние повышенных температур воздуха, наблюдаемых в период потепления в Арктике.

Лед, который образуется в заприпайных полыньях приустьевых районов сибирских рек, имеет пониженную соленость. Величина объема льдов, формирующихся ежегодно в полыньях МСШ, и аккумулярованной в них пресной воды в значительной степени влияет на пресноводный баланс СЛО. Многолетние изменения объемов льдов и новых вод, генетически связанных с заприпайными полыньями должны найти отражение в колебаниях климатической системы. В связи с вышесказанным, представляется весьма важным оценить объемы льдов, формирующихся ежегодно в заприпайных полыньях МСШ, и определить их роль в формировании поверхностных арктических вод.

В работах А.В.Попова [16–17, 27–28], приводятся оценки скорости нарастания льда в ЗП, величины объема новых льдов и аккумулярованных в них пресных вод. Для получения приближенных оценок использовался ряд простейших моделей, которые не требовали большого объема вычислений, по сложным моделям, учитывающим взаимодействие атмосферы, льда и океана. На наш взгляд, увеличение точности полученных оценок не изменит основные выводы работы, связанные с исследованием многолетней и климатической изменчивости. В известной работе «Морские воды и льды» [7] Н.Н.Зубов вывел формулу расчета толщины льда спокойного нарастания. Многочисленные исследования, выполненные с использованием формулы Зубова, позволяют сделать вывод о надежности оценки нарастания припайного льда в относительно спокойных в динамическом отношении районах. Для исследования нарастания льда в таких активных в динамическом отношении районах, какими являются заприпайные полыньи, формула Зубова неприемлема. Развивая метод Стефана–Зубова, К.Д.Сабинин [18] вывел теоретическую формулу, позволяющую вычислить суммарную толщину льда в любой точке заприпайной полыни:

$$J = i + \Delta i = -25 + \sqrt{625 + \frac{8\Theta x}{\nu}} - \frac{4\Theta(T - x/\nu)}{\sqrt{625 + \frac{8\Theta x}{\nu}}}. \quad (1)$$

В формуле (1) введены следующие обозначения:  $J$  – суммарная толщина льда, выросшего за зиму в любой точке полыни;  $i$  – толщина льда;  $x$  – расстояние от кромки припая в км;  $\nu$  – скорость выноса в км/сутки;  $\Theta$  – разность температур воды и воздуха в °С. С момента начала замерзания нарастание льда в любой точке полыни определяется соотношением Зубова. Этот процесс продолжается до момента времени  $T_0 = x/\nu$  дней, в дальнейшем устанавливается «как бы динамическое равновесие: несмотря на то, что нарастание льда продолжается, толщина его в каждой точке остается неизменной, так как нарастание льда компенсируется его выносом» [18]. По формуле (1) можно рассчитать суммарную толщину льда в любой точке зоны выноса. В данном случае зоной выноса К.Д.Сабинин считал зону от  $x = 0$  (кромка припая) до  $x = T\nu$ , так как на большем расстоянии от кромки припая нарастание льда уже не будет искажаться его выносом. К сожалению, формула К.Д.Сабинина очень редко использовалась для практических расчетов.

Как будет показано ниже, расчеты, выполненные с использованием данной формулы, дают весьма неплохие результаты.

В последние годы многие исследователи, занимающиеся изучением заприпайных полыней, используют одномерную модель, описанную в работах С.Мартина и Д.Кавальери [24, 26]. Скорость нарастания льда по [24, 26] может быть рассчитана на основании следующего соотношения:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{F_{net}}{\rho_i L}, \quad (2)$$

где  $\rho_i = 0,92 \times 103 \text{ кг/м}^3$  – плотность морского льда,  $L = 3.34 \times 103 \text{ Дж кг}^{-1}$  – теплота плавления морского льда,  $F_{net}$  – суммарный тепловой поток с поверхности полыньи. В выражение (2) входит неизвестная величина  $F_{net}$ . В многочисленных исследованиях для определения данной величины используют модели различной степени сложности. В ААНИИ в Отделе взаимодействия атмосферы и океана еще в 1980-е гг. была разработана одна из таких моделей. В дальнейшем данная модель была существенно дополнена и модифицирована: С.В.Шутилиным были выполнены соответствующие расчеты величины  $F_{net}$ .

При расчетах была использована следующая схема: в первый момент принималось, что акватория полыньи полностью свободна ото льда; по среднесуточным данным о температуре, давлении, ветре и влажности с использованием модели Отдела взаимодействия атмосферы и океана рассчитывался суммарный поток, по этому потоку рассчитывалась толщина суточного приращения льда в полынье. С использованием экспоненциальной зависимости потока от толщины льда выполнялся пересчет потока. Эта операция повторялась до тех пор, пока итоговая толщина льда не достигала 30 см (обычно для этого требовалось от 3 до 5 суток). Если, согласно данным снимка ИСЗ, полынья все еще сохранялась, то мы считали, что весь лед вынесен за пределы полыньи, и расчетный процесс повторялся. Затем ежесуточные приращения льда суммировались за все время существования полыньи. Для расчетов по описанным выше методикам и моделям для всех заприпайных полыней необходимо иметь данные о температуре воздуха и воды, влажности и ветре. Эти данные были получены следующим образом: в ряде точек в районе каждой полыньи по данным массива ре-анализа NCEP/NCAR выполнялась выборка среднесуточных данных о температуре, давлении и влажности. По полю давления рассчитывался ветер. Затем выполнялось пространственное осреднение данных, относящихся к конкретной полынье. В результате для каждой из 21 полыньи морей Сибирского шельфа были получены временные ряды ежесуточных данных о температуре, влажности и ветре за все холодные периоды (ноябрь–май) с 1978 по 2005 г. Данная работа была выполнена сотрудником Отдела взаимодействия атмосферы и океана С.В.Шутилиным. Для определения репрезентативности рядов метеоданных была выполнена проверка их чувствительности к открытию полыньи к прохождению циклонов. Данные по температуре и солёности выбирались из базы океанографических данных для точек наиболее близких к исследуемой полынье. В случае отсутствия данных использовалось среднесезонное значение параметра за зимний сезон.

С использованием вышеописанных методик были выполнены расчеты ежесуточного приращения льда во всех заприпайных полынях морей Сибирского шельфа. Результаты расчетов этой величины приведены в табл. 1. В работе Детлефа [25] приводится ежедневная скорость нарастания льда в полынях моря Лаптевых в декабре 1991 г. – январе 1992 г., она составляет 5,1–13,3 см/день. Сравнивая эти величины с расчетными данными из табл. 1, мы видим, что скорости приращения толщины льда, полученные по методике Сабинина, несколько меньше наблюдаемых величин, а данные, полученные по методике Кавальери, оказались больше. Истинные значения лежат где-то в промежутке между данными, по-

лученными по этим методикам. Временная изменчивость полученных рядов практически идентична. Коэффициенты корреляции временных рядов, полученных по разным методикам, изменяются в пределах от 0,91 до 0,99.

Суммируя ежесуточные данные по толщинам льда, мы рассчитали так называемую «эффективную» толщину льда для каждой из рассматриваемых полыней. «Эффективная» толщина льда – сумма толщин льда, генерируемого в полынье в течение всего периода ледообразования при условии постоянного выноса льдов, достигших толщины 30 см, к подветренной стороне полыни. Данные о средних, максимальных и минимальных значениях «эффективных» толщин льда для каждой из исследуемых полыней представлены в табл. 2. Кроме этого здесь приведены значения толщин льда спокойного нарастания (без учета выноса льда к подветренной стороне полыни), рассчитанные по формуле Н.Н.Зубова [7].

В работе [18] приведены результаты В.Н.Купецкого [11], который на основании формулы Зубова и предположении о ежесуточном взломе и выносе льда получил следующие значения суммарных толщин льда: Обь-Енисейская полынья – 6,48 м; Североземельская полынья – 7,20 м; Таймырская полынья – 8,16 м.

Таблица 1

**Средние, максимальные и минимальные значения ежесуточных величин приращения толщины льда в полынях Карского, Лаптевых и Восточно-Сибирского морей в холодные сезоны за период с 1978 по 2005 г. (по моделям Сабинина и Кавальери)**

Полынья	Суточное приращение толщины льда в ЗП					
	По Сабинину			По Мартину и Кавальери		
	Среднее, см	Максимум, см	Минимум, см	Среднее, см	Максимум, см	Минимум, см
ЮЗФИ	3,26	4,93	0,50	9,72	17,70	3,20
СНЗП	3,28	5,19	0,19	9,32	10,98	7,37
ЮНЗП	3,01	5,27	0,54	7,34	10,06	4,71
АП	3,12	4,32	1,81	7,04	8,92	0,70
ЯП	3,53	4,62	2,07	9,36	11,43	6,02
ОЕП	4,00	5,18	2,19	10,48	12,50	8,94
ЦКП	3,90	5,12	2,83	11,05	13,34	8,85
ЗСЗП	4,00	8,58	2,13	11,24	15,96	7,97
Все пол. КМ	3,51	8,58	0,19	9,44	17,70	0,70
ВСЗП	4,12	5,34	3,06	9,68	12,93	1,75
СВТП	4,38	5,79	2,82	9,96	13,19	3,34
ВТП	4,36	5,71	1,94	9,55	13,26	2,56
АЛП	3,81	4,86	1,93	9,12	12,78	1,88
ЗНСП	3,75	4,79	1,64	10,05	11,88	7,44
НСП	3,66	4,80	2,42	9,14	11,88	2,14
Все пол. МЛ	4,01	5,79	1,64	9,58	13,26	1,75
ВНСП(з)	3,83	5,60	2,20	9,09	12,11	5,57
ВНСП(в)	3,82	5,53	1,42	8,81	12,58	6,00
АйП	3,71	5,17	1,40	9,53	14,20	5,67
ЗЧП	3,22	5,27	0,66	9,55	15,55	3,46
Все пол. ВСМ	3,65	5,60	0,66	9,24	15,55	3,46
Все пол. МСШ	3,26	8,58	0,19	8,32	17,70	0,70

*Примечание:* ЮЗФИ – южная полынья Земли Франца-Иосифа; СНЗП – Северная Новоземельская полынья; ЮНЗП – Южная Новоземельская полынья; АП – Амдерминская полынья; ЯП – Ямальская полынья; ОЕП – Обь-Енисейская полынья; ЦКП – Центральная Карская полынья; ЗСЗП – Западная Североземельская полынья; КМ – Карское море; ВСЗП – Восточная Североземельская полынья; СВТП – Северо-Восточная Таймырская полынья; ВТП – Восточная Таймырская полынья; АЛП – Анабаро-Ленская полынья; ЗНСП – Западная Новосибирская полынья; НСП – Новосибирская полынья; МЛ – море Лаптевых; ВНСП(з) – Восточная Новосибирская полынья (запад); ВНСП(в) – Восточная Новосибирская полынья (восток); АйП – Айонская полынья; ЗЧП – Западно-Чукотская полынья; ВСМ – Восточно-Сибирское море; МСШ – моря Сибирского шельфа

Средние, максимальные и минимальные значения «эффективных» толщин льда в полынях Карского, Лаптевых и Восточно-Сибирского морей в холодные сезоны за период с 1978 по 2005 г. (по методикам Зубова, Сабинина и Кавальеры)

Полынья*	Толщина льда спокойного нарастания за ноябрь—май						«Эффективная» толщина льда за время существования полынью					
	По Зубову			По Сабинину			По Мартину—Кавальеры					
	Среднее, м/Т <sub>пол</sub>	Максимум, м/Т <sub>пол</sub>	Минимум, м/Т <sub>пол</sub>	Среднее, м/Т <sub>пол</sub>	Максимум, м/Т <sub>пол</sub>	Минимум, м/Т <sub>пол</sub>	Среднее, м/Т <sub>пол</sub>	Максимум, м/Т <sub>пол</sub>	Минимум, м/Т <sub>пол</sub>	Среднее, м/Т <sub>пол</sub>	Максимум, м/Т <sub>пол</sub>	Минимум, м/Т <sub>пол</sub>
ЮЗФИ	1,65	1,91	1,22	2,43	6,06	0,11	6,46	15,64	0,73	6,46	15,64	0,73
СНЗП	1,56	1,83	1,35	3,36	7,48	0,02	9,10	15,34	1,80	9,10	15,34	1,80
ЮНЗП	1,30	1,64	1,11	2,81	6,24	0,05	6,69	11,40	0,47	6,69	11,40	0,47
АП	1,27	1,61	0,06	3,35	5,98	0,18	7,55	12,58	0,51	7,55	12,58	0,51
ЯП	1,47	1,77	1,24	3,69	5,64	1,09	9,54	14,77	2,50	9,54	14,77	2,50
ОЕП	1,61	1,84	1,19	6,54	10,98	2,14	16,52	24,05	6,25	16,52	24,05	6,25
ЦКП	1,79	1,94	1,64	5,33	8,95	1,15	13,72	24,69	3,00	13,72	24,69	3,00
ЗСЗП	1,83	1,98	1,68	4,97	18,19	1,08	11,30	20,32	3,20	11,30	20,32	3,20
Все КМ	1,56	1,98	0,06	4,06	18,19	0,02	10,12	24,69	0,47	10,12	24,69	0,47
ВСЗП	1,85	2,02	1,69	4,11	7,89	0,65	8,64	17,76	2,07	8,64	17,76	2,07
СВТП	1,85	2,01	1,69	5,14	8,98	0,63	10,57	21,49	1,16	10,57	21,49	1,16
ВТП	1,87	1,99	1,62	4,35	7,80	0,31	8,73	16,05	1,06	8,73	16,05	1,06
АЛП	1,80	1,90	1,32	5,28	8,84	0,98	11,33	22,03	2,48	11,33	22,03	2,48
ЗНСП	1,81	1,94	1,45	5,09	8,68	1,02	12,06	21,85	3,22	12,06	21,85	3,22
НСП	1,83	1,99	1,62	4,80	8,14	0,73	11,32	19,64	1,60	11,32	19,64	1,60
Все МЛ	1,83	2,02	1,32	4,83	8,98	0,31	10,42	22,03	1,06	10,42	22,03	1,06
ВНСП(З)	1,83	1,99	1,59	3,30	6,71	0,36	8,14	15,92	3,62	8,14	15,92	3,62
ВНСП(В)	1,84	1,99	1,65	2,62	6,08	0,40	6,55	14,57	1,26	6,55	14,57	1,26
АйП	1,74	1,87	1,55	3,03	5,50	0,42	7,18	11,89	1,42	7,18	11,89	1,42
ЗЧП	1,69	1,86	1,41	1,54	3,55	0,20	4,30	7,61	1,07	4,30	7,61	1,07
Все. ВСМ	1,78	1,99	1,41	2,63	6,71	0,20	6,56	15,92	1,07	6,56	15,92	1,07
Все МСШ	1,70	2,02	0,06	3,99	18,19	0,02	9,43	24,69	0,47	9,43	24,69	0,47

\* Сокращения те же, что и в табл. 1

При нормальном нарастании льда (без учета выноса) здесь мог образоваться лед толщиной 1,60 м, 1,75 м и 1,82 м, соответственно. В работах [2, 25] приводятся оценки «эффективных» толщин льда, полученные по самым разнообразным методикам. Полученные нами величины сопоставимы с оценками других авторов.

Интегрируя значения «эффективных» толщин льда по пространству полыней, мы получили объемы льдов, продуцируемых в запрпайных полынях каждого из морей Сибирского шельфа. Как показано выше, методика Сабинаина занижает, а методика Кавальери завышает оценку ежесуточного приращения толщин льда. Поэтому для получения оценок ледопродуктивности полыней, максимально приближенных к истинным значениям, мы рассчитали объемы льдов, образованных в полынях каждого моря, как среднее арифметическое значений, полученных по разным методикам. Таким образом были рассчитаны все искомые величины за период 1978–2005 гг. Методика получения оценок величин за период 2005–2008 гг. приведена ниже. Спокойное нарастание льда без учета его выноса для периода 1978–2005 гг. рассчитывалось по формуле Зубова и затем интегрировалось по площади всего моря, а для периода 2005–2008 гг. использовались оценки из работы [19]. Из табл. 3 ви-

Таблица 3

**Объемы новых льдов, образованных в запрпайных полынях Карского моря ( $V_{\text{лед пол.}}$ , км<sup>3</sup>), запаса пресной воды в этих льдах ( $V_{\text{пр.воды}}$ , км<sup>3</sup>), соотношение (%) объема новых льдов к общему объему льда в море ( $V_{\text{лед}}$ , км<sup>3</sup>) и соотношение пресной воды в новых льдах к общему стоку рек в море ( $V_{\text{сток}}$ , км<sup>3</sup>)**

Год	$V_{\text{лед пол.}}$ , км <sup>3</sup>	$V_{\text{лед пол.}}/V_{\text{лед.}}$ , %	$V_{\text{пр.воды}}$ , км <sup>3</sup>	$V_{\text{пр.воды}}/V_{\text{сток}}$ , %
1978–1979	169	11	122	9
1979–1980	185	15	133	10
1980–1981	310	25	223	17
1981–1982	258	20	186	14
1982–1983	376	28	271	20
1983–1984	362	30	261	20
1984–1985	678	51	488	37
1985–1986	604	46	435	33
1986–1987	571	42	411	31
1987–1988	579	44	417	31
1988–1989	596	44	429	32
1989–1990	644	56	464	35
1990–1991	664	48	478	36
1991–1992	497	38	358	27
1992–1993	760	56	547	41
1993–1994	535	40	385	29
1994–1995	909	76	654	49
1995–1996	718	56	517	39
1996–1997	841	65	606	45
1997–1998	656	50	472	35
1998–1999	574	42	413	31
1999–2000	390	34	281	21
2000–2001	685	56	493	37
2001–2002	1242	103	895	60
2002–2003	783	58	563	42
2003–2004	1169	88	842	63
2004–2005	1006	85	725	54
2005–2006	1182	91	850	64
2006–2007	920	71	661	50
2007–2008	1097	85	789	59
Среднее	665	52	479	34
Максимум	1242	103	850	64
Минимум	169	11	122	9

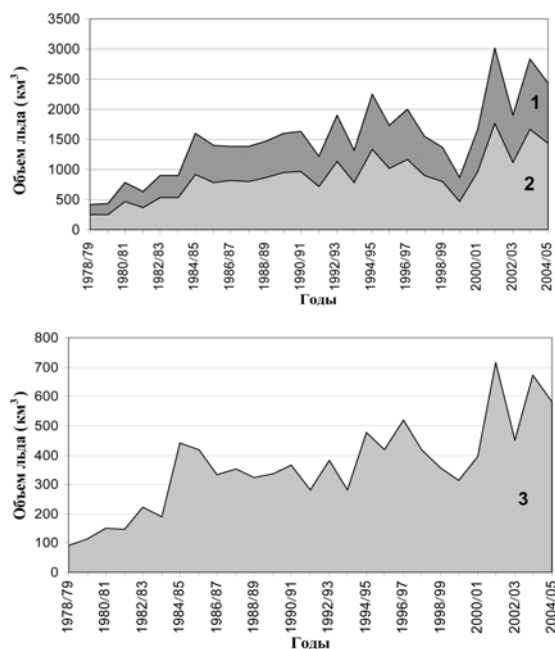


Рис. 1. Диаграммы временной изменчивости объемов льдов, образованных в полыньях Карского моря, рассчитанные по: Кавальери – 1, среднее – 2 и по Сабину – 3

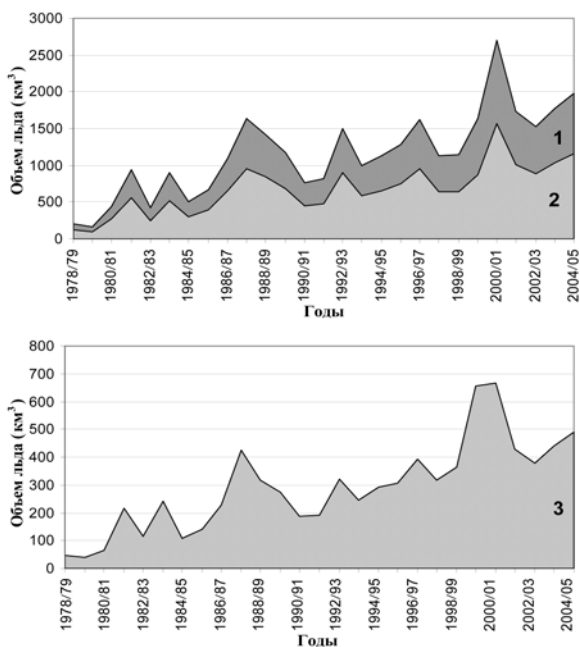


Рис. 2. Диаграммы временной изменчивости объемов льдов, образованных в полыньях моря Лаптевых, рассчитанные по: Кавальери – 1, среднее – 2 и по Сабину – 3



дим, что объем льда, генерируемого в ЗП Карского моря, составляет от 11 до 103 % от объема льда во всем море, рассчитанного без учета выноса льда. Среднее значение для Карского моря составило 52 %. Многолетние изменения объемов льда, генерируемых в ЗП Карского моря, иллюстрирует рис. 1.

В работе [17] по формуле, приведенной в работе А.О.Шпайхера [19] выполнена оценка объемов пресной воды, аккумулированной в новых льдах, образованных в ЗП. В табл. 3–5 приведены оценки объема пресных вод, аккумулированных во льдах, образованных в ЗП. Как видно из табл. 3, объем пресных вод, аккумулированный во льдах, образованных во всех полыньях Карского моря за ноябрь–май, составляет от 9 до 67 % от среднееголетнего суммарного годового стока рек в это море. Средняя за холодный сезон сумма площадей полыней Карского моря составляет всего 6,2–14,4 % от всей площади моря – среднее значение 9,4 % (рис. 2)

Как видно из рис 2. и табл. 4 объем льда, формирующегося в заприпайных полыньях моря Лаптевых, составляет от 7 до 118 % от объема льда во всем море, рассчитанного без учета выноса льда. Средняя величина объема новых льдов составляет 54 %. Объем пресных вод, аккумулированный во льдах, образованных в

Таблица 4

**Объемы новых льдов, образованных в заприпайных полыньях моря Лаптевых ( $V_{\text{лед пол.}}$ , км<sup>3</sup>), запаса пресной воды в этих льдах ( $V_{\text{пр.воды}}$ , км<sup>3</sup>), соотношение (%) объема новых льдов к общему объему льда в море ( $V_{\text{лед}}$ , км<sup>3</sup>) и соотношение пресной воды в новых льдах к общему стоку рек в море ( $V_{\text{сток}}$ , км<sup>3</sup>)**

Год	$V_{\text{лед пол.}}$ , км <sup>3</sup>	$V_{\text{лед пол.}}/V_{\text{лед.}}$ , %	$V_{\text{пр.воды}}$ , км <sup>3</sup>	$V_{\text{пр.воды}}/V_{\text{сток}}$ , %
1978–1979	82	8	57	8
1979–1980	67	7	47	6
1980–1981	166	19	116	15
1981–1982	385	39	270	36
1982–1983	182	18	127	17
1983–1984	382	38	268	35
1984–1985	203	20	142	19
1985–1986	268	27	188	25
1986–1987	438	43	307	40
1987–1988	689	69	482	63
1988–1989	579	58	405	53
1989–1990	480	49	336	44
1990–1991	319	32	223	29
1991–1992	337	34	236	31
1992–1993	608	59	425	56
1993–1994	414	40	290	38
1994–1995	476	49	333	44
1995–1996	528	54	369	49
1996–1997	670	67	469	62
1997–1998	482	50	338	44
1998–1999	504	52	353	46
1999–2000	764	81	535	70
2000–2001	1121	116	785	103
2001–2002	718	75	503	66
2002–2003	635	67	445	59
2003–2004	738	78	517	68
2004–2005	822	85	576	76
2005–2006	618	63	433	57
2006–2007	1164	118	815	107
2007–2008	955	97	669	88
Среднее	526	54	369	49
Максимум	1164	118	815	107
Минимум	67	7	47	6



полюньях моря Лаптевых за ноябрь–май, составляет от 6 до 107 % от среднемноголетнего суммарного годового стока рек в это море, при среднем значении 49 %. Средняя за холодный сезон сумма площадей полыней моря Лаптевых составляет всего 6,7–16,0 % от всей площади моря – среднее значение 10,3 % (рис. 2).

Из табл. 5 и рис. 3 видим, что объем льда, образованного в ЗП Восточно-Сибирского моря, значительно меньше объемов льда генерируемого в ЗП морей Карского и Лаптевых и составляет 0,07–29 % от объема льда во всем море, рассчитанного без учета выноса льда. Среднее значение для данного моря составило 8 %. Как видно из табл. 5, объем пресных вод, аккумулированный во льдах, образованных в полюньях Восточно-Сибирского моря за ноябрь–май, составляет 0,3–115 % от среднемноголетнего суммарного годового стока рек в это море, при среднем значении 33 %. Средняя за холодный сезон сумма площадей полыней Восточно-Сибирского моря составляет всего 0,2–6,0 % от площади моря – среднее значение 2,6 % (рис. 3).

Согласно расчетам по моделям Сабинина и Мартина–Кавальери, максимальный объем льда за период с 1978 по 2005 г. был образован в полюньях моря Лапте-

Таблица 5

**Объемы новых льдов, образованных в заприпайных полюньях Восточно-Сибирского моря ( $V_{\text{лед пол.}}$ , км<sup>3</sup>), запаса пресной воды в этих льдах ( $V_{\text{пр.воды}}$ , км<sup>3</sup>), соотношение (в %) объема новых льдов к общему объему льда в море ( $V_{\text{лед}}$ , км<sup>3</sup>) и соотношение пресной воды в новых льдах к общему стоку рек в море ( $V_{\text{сток}}$ , км<sup>3</sup>)**

Год	$V_{\text{лед пол.}}$ , км <sup>3</sup>	$V_{\text{лед пол.}}/V_{\text{лед}}$ , %	$V_{\text{пр.воды}}$ , км <sup>3</sup>	$V_{\text{пр.воды}}/V_{\text{сток}}$ , %
1978–1979	1,0	0,07	1	0
1979–1980	3	0,19	2	1
1980–1981	19	1	14	6
1981–1982	85	6	60	26
1982–1983	53	4	38	17
1983–1984	61	4	43	19
1984–1985	68	5	48	21
1985–1986	80	6	57	25
1986–1987	98	7	70	31
1987–1988	125	9	89	39
1988–1989	180	13	128	56
1989–1990	271	20	193	84
1990–1991	119	8	85	37
1991–1992	66	5	47	20
1992–1993	226	16	160	70
1993–1994	145	10	103	45
1994–1995	158	11	112	49
1995–1996	68	5	48	21
1996–1997	70	5	50	22
1997–1998	82	6	58	26
1998–1999	29	2	21	9
1999–2000	4	0,33	3	1
2000–2001	7	1	5	2
2001–2002	94	7	67	29
2002–2003	67	6	48	21
2003–2004	167	14	119	52
2004–2005	238	18	169	74
2005–2006	151	12	109	47
2006–2007	361	29	263	115
2007–2008	123	10	91	40
Среднее	107	8	77	33
Максимум	361	29	263	115
Минимум	1	0,07	1	0

вых в холодный сезон 2000/01 г. Величина объема новых льдов составила 1121 км<sup>3</sup>, что на 16 % больше объема льда, который мог бы образоваться в море – при отсутствии постоянного выноса. При этом новые льды аккумулировали 785 км<sup>3</sup> пресной воды, что на 3 % больше среднегодового стока рек в море Лаптевых. Данное превышение, по-видимому, свидетельствует о том, что в подповерхностном слое моря Лаптевых в холодный сезон 2000/01 г. должна сформироваться область с повышенной соленостью. В полыньях Карского моря наибольшее количество льда образовалось в зимний сезон 2001/02 г.: объем новых льдов – 1109 км<sup>3</sup> (92 %) и объем аккумулированных вод – 893 км<sup>3</sup> (67 %).

Арктические заприпайные полыньи действительно представляют собой своеобразные «фабрики льда» – при относительно небольших размерах от 1 до 16 % от площади моря они способны продуцировать объемы льда иногда даже большие чем, могло образоваться в море при отсутствии полыней и спокойном образовании льда. В соответствии с вышесказанным, ледопродуктивность заприпайных полыней должна в значительной степени определять многолетнюю изменчивость вклада новых льдов в пресноводный баланс СЛО.

Временные ряды, полученные в результате расчетов по моделям Сабинина и Мартина–Кавальери, заканчиваются сезоном 2004/05 г. Это связано с тем, что в нашем распоряжении были ежесуточные метеоданные лишь до мая 2005 г. В отсутствие метеоданных, для получения оценок объемов новых льдов для каждой полыньи мы использовали следующие величины: среднемноголетнюю величину суточного приращения льда, время существования полыней и фактические декадные площади. В качестве примера рассмотрим получение оценок объемов льда и пресной воды в холодный сезон 2006/07 г. В табл. 6 приведены данные, необходимые для расчета ледопродуктивности полыней МСШ. Как видно из табл. 6, к этим

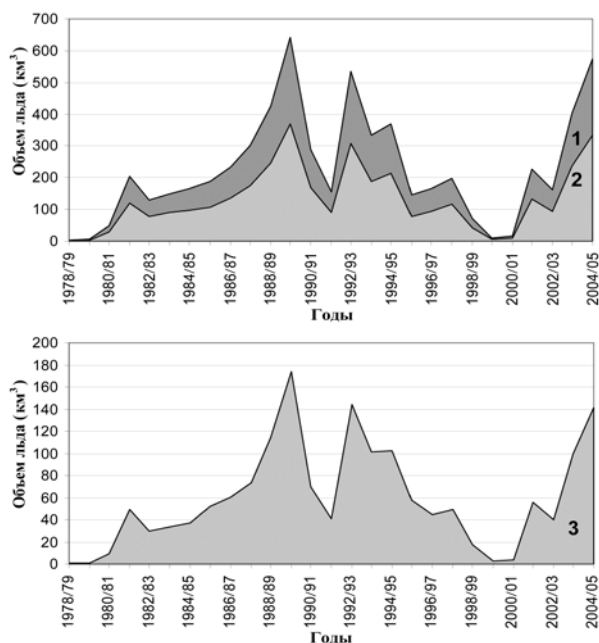


Рис. 3. Диаграммы временной изменчивости объемов льдов, образованных в полыньях Восточно-Сибирского моря, рассчитанные по: Кавальери – 1, среднее – 2 и по Сабинину – 3

данным относятся длительность существования полярной льды, средняя площадь, средне-многолетняя величина суточного приращения льда, оценочные значения «эффективной» толщины и объема льда, образованного в каждой из полярной МСШ. Кроме того, здесь представлены расчетные величины объема пресной воды, аккумулированной новыми льдами.

В сезон 2006/07 г. сумма средних площадей ЗП Карского моря составила 88614 км<sup>2</sup>, или 11 % от площади моря. Максимальные значения отмечены во вторую декаду декабря 2006 г. – 107710 км<sup>2</sup>, 13 % от площади моря. Согласно оценке А.О.Шпайхера [19], объем льда в Карском море к концу зимы составляет 1520 км<sup>3</sup>. Наши расчеты показывают, что за сезон 2006/07 г. в ЗП Карского моря образовалось 920 км<sup>3</sup> льда – 69 % от величины общего объема льда в море, предложенной А.О.Шпайхером [19]. Средне-многолетний сток рек в Карское море составляет 1330 км<sup>3</sup> [20]. Доля пресных вод, аккумулированных новыми льдами в полярных Карского моря, составляет 50 % от величины среднегодового стока. Суммируя объемы льда, образованного в отдельных полярных моря Лаптевых, получаем величину – 1164 км<sup>3</sup>, что составляет 78 % от объема льдов, имеющих в море. По оценке А.О.Шпайхера [19], к концу зимы объем льдов в море Лаптевых составляет 1490 км<sup>3</sup>. Во льдах, образованных в ЗП моря Лаптевых, содер-

Таблица 6

Оценки «эффективной толщины» льда ( $H_{эфф.}$ ), объема льдов ( $V_{льда}$ ) и пресной воды ( $V_{пр.воды}$ ), аккумулированной этими льдами, образованных в заполярных полярных морей сибирского шельфа в холодный сезон 2006–2007 гг.

Полярная	Время жизни полярной, сутки	Средние значения		$H_{эфф.}$ , м/г.пол.	$V_{льда}$ , км <sup>3</sup>	$V_{пр.воды}$ , км <sup>3</sup>
		площадь, км <sup>2</sup>	толщина льда, см/сут			
Карское море						
ЮВЗФИ	141	3083	6,5	9,2	28	20
СНЗП	144	9530	6,3	9,1	86	62
ЮНЗП	102	6582	5,2	5,3	35	25
АП	100	12182	5,1	5,1	62	44
ЯП	172	11922	6,4	11,1	132	95
ОЕП	192	19442	7,2	13,9	270	194
ЦКП	161	16563	7,5	12,0	199	143
ЗСЗП	151	9311	7,6	11,5	107	77
Море Лаптевых						
ВСЗП	201	13432	6,9	13,9	186	134
СВТП	192	12059	7,2	13,8	166	119
ВТП	184	8383	7,0	12,8	107	77
АЛП	202	27827	6,5	13,1	364	261
ЗНСП	149	18757	6,9	10,3	193	139
НСП	182	12666	6,4	11,6	148	106
Восточно-Сибирское море						
ВНСП(з)	174	8306	6,5	11,2	93	67
ВНСП(в)	154	5278	6,3	9,7	51	37
АйП	152	15401	6,6	10,1	155	111
ЗЧП	90	10749	6,4	5,7	62	44
Чукотское море						
ВЧП	59	9905	5,8	3,4	34	24
ЮВП	49	4566	6,6	3,2	15	11
СВП	134	2061	5,9	7,9	16	12

Примечания. 1. Сокращения, использованные для обозначения полярной Карского и Восточно-Сибирского море, а также моря Лаптевых те же, что и в табл. 1. 2. Сокращения для полярной Чукотского моря: ВЧП – Восточно-Чукотская прогалина; ЮВП – Южная Врангелевская полярная; СВП – Северная Врангелевская полярная

жится 836 км<sup>3</sup> пресной воды. Среднегодовой сток рек в море Лаптевых составляет 760 км<sup>3</sup> [20], таким образом, объем пресных вод, аккумулированных новыми льдами, составил 110 % от среднегодового стока. В ЗП Восточно-Сибирского моря в сезон 2006/07 г. образовано 361 км<sup>3</sup> новых льдов – 29 % от общего объема льдов в море. Новые льды аккумулировали 255 км<sup>3</sup> пресной воды, что составляет 113 % от среднегодового стока (229 км<sup>3</sup> по [20]). Объем льда, образованного в полыньях Чукотского моря, незначителен и составляет всего 65 км<sup>3</sup>, а объем пресной воды в этих льдах равен 47 км<sup>3</sup>.

Как видно из рис. 1–3 и табл. 3–5, временная изменчивость объемов льда, формирующихся в заприпайных полыньях МСШ, весьма велика. Максимальная амплитуда межгодовых колебаний величин объема льдов, образовавшихся в Карском море, составляет 1074 км<sup>3</sup>, а амплитуда изменений объема льда спокойного нарастания составляет всего 367 км<sup>3</sup>. Для моря Лаптевых эти величины составляют 1097 км<sup>3</sup> и 192 км<sup>3</sup> соответственно, а для Восточно-Сибирского моря – 360 км<sup>3</sup> и 273 км<sup>3</sup>. Как видно из этих оценок, амплитуда многолетних изменений объемов льда, формирующихся в ЗП морей Карского и Лаптевых, близка к величине суммарной ледопродуктивности этих морей, полученной А.О.Шпайхером [19]. Столь значительные изменения в продукции новых льдов должны найти свое отражение в изменениях климата. Причем эффект влияния повышения продукции новых льдов должен проявиться, по меньшей мере, дважды. Во-первых, в сезон непосредственного образования новых льдов – через усиление энергообмена с атмосферой и влияния региональных циклонов. Во-вторых, через «время добегания» при выходе в Гренландское море и Северную Атлантику – посредством изменения солености поверхностных вод, изменения условий конвекции в Гренландском и Лабрадорском морях, изменения площади льда в Восточно-Гренландском ледовом поясе и у о. Ньюфаундленд и, в конечном счете, изменения условий циклогенеза в Северной Атлантике и путей движения циклонов. В-третьих, возможен еще более отсроченный отклик климатической системы – через механизм формирования донных вод СЛО и участия этих вод в глобальном переносе донных вод.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев Г.В.* Современные изменения климата Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2000. № 72. С. 42–71.
2. *Дмитренко И.А., Кирилов С.А., Грибанов В.А., Кассенс Х.* Оценка ледопродуктивности стационарных полыней на шельфе морей Карского и Лаптевых на основе многолетних гидрологических наблюдений // Метеорология и гидрология. 2001. № 12. С. 38–49.
3. *Гудкович З.М.* Об основных закономерностях дрейфа льдов в Центральном Полярном бассейне // Материалы конференции по проблеме «Взаимодействие атмосферы и гидросферы в северной части Атлантического океана». Вып. 3–4. Л.: Гидрометеиздат, 1961. С. 75–78.
4. *Захаров В.Ф.* Морские льды в климатической системе. СПб.: Гидрометеиздат, 1996. 213 с.
5. *Захаров В.Ф.* Пространственно-временная характеристика деятельного слоя океана в высоких широтах и его влияние на географическое распространение льда // Морской лед / Под ред. И.Е.Фролова и В.П.Гаврило. СПб.: Гидрометеиздат, 1997. С. 186–191.
6. *Захаров В.Ф.* Изменение в распространении морских арктических льдов в XX веке // Метеорология и гидрология. № 5. 2003. С. 75–86.
7. *Зубов Н.Н.* Морские воды и льды. М.: Гидрометеиздат, 1938. 454 с.
8. *Колтышев А.Е., Никифоров Е.Г., Тимохов Л.А.* Распределение деятельного слоя Арктического бассейна и глубоководной части арктических окраинных морей // Труды ААНИИ. 2008. Т. 448. С. 18–28.

9. Колтышев А.Е., Никифоров Е.Г., Тимохов Л.А., Гарманов А.Л. Крупномасштабная изменчивость ареалов распространения распресненных вод в Арктическом бассейне // Труды ААНИИ. 2008. Т. 448. С. 37–58.
10. Кочетов С.В., В.Е. Соколова, Тимохов Л.А. О стоке пресных вод и льдов из морей Сибирского шельфа в Арктический бассейн // Труды ААНИИ. 2008. Т. 448. С. 92–102.
11. Купецкий В.Н. Стационарные полыньи в замерзающих морях: Дис. ... канд. геогр. наук. Л., 1959. 356 с.
12. Попов А.В., Карелин И.Д., Иванов Б.В. Заприпайные полыньи моря Лаптевых и изменения Климата // Труды Арктического Регионального Центра. Том II. Ч. 1. Гидрометеорологические и биогехимические исследования в Арктике. Владивосток: Изд. Дальнаука, 2000. С. 44–52.
13. Попов А.В. Влияние заприпайных полыней на формировании погоды и трансформации термобарического поля Северной Полярной области // Электронный журнал «Новости ЕСИМО» (<http://www.oceaninfo.ru/news/>), Обнинск, ВНИИГМИ-МЦД. 2003. № 13. 18 с.
14. Попов А.В., Карелин И.Д., Рубченя А.В. Роль зимних заприпайных полыней в формировании ледовых условий в морях Сибирского шельфа в летний период // Метеорология и гидрология. 2007. № 9. С. 65–73.
15. Попов А.В. Экстремальные ледовые условия в Арктических морях – анализ причин и возможности прогнозирования // Материалы гляциологических исследований. 2008. Т. 105. С. 41–50.
16. Попов А.В., Рубченя А.В. Роль заприпайных полыней в формировании дальних связей в климатической системе // Тезисы конференции «Моря высоких широт и морская криосфера». Санкт-Петербург, 25–27 октября 2007 г., СПб.: ААНИИ, 2007. С. 69–71.
17. Попов А.В., Рубченя А.В. Ледопродуктивность заприпайных полыней морей Сибирского шельфа // Географические и геоэкологические аспекты развития природы и общества / Под ред. Н.В.Каледина, В.В.Дмитриева и Т.А.Алиева. СПб.: СПбГУ, 2008. С. 237–256.
18. Сабинин К.Д. К вопросу о нарастании льда и зимней вертикальной циркуляции в заприпайных полыньях // Вопросы океанологии. М.: Изд-во МГУ, 1960. С. 92–105.
19. Шнайхер А.О. Количество пресной воды в морских льдах полярных областей земного шара // Труды ААНИИ. 1976. Т. 323. С. 168–177.
20. Шикломанов И.А. Изменения климата и сток рек, впадающих в Северный Ледовитый океан // Тезисы конференции «Моря высоких широт и морская криосфера». Санкт-Петербург, 25–27 октября 2007 г. СПб.: ААНИИ, 2007. С. 83.
21. Aagaard K., Carmack E.C. The role of sea ice and other fresh water in the Arctic Circulation // J. Geophys. 1989. Res. 94 (C10). P. 14485–14498.
22. Belkin I.M., Levitus S., Antonov J.I., Malmberg S.A. «Great Salinity Anomalies» in the North Atlantic Ocean // Prog. Oceanogr. 1998. Vol. 41. P. 1–68.
23. Bareiss T.J., Gorgen K. Spatial and temporal variability of sea ice in the Laptev Sea: Analyses and review of satellite passive-microwave data and model results, 1979 to 2002. // Global and Planetary Change. 2005. Vol. 48. P. 28–54.
24. Cavalieri D.J., Martin S. The contribution of Alaskan, Siberian, and Canadian coastal polynyas to the halocline layer of Arctic Ocean // Journal of Geophysical Research. 1994. Vol. 99. № C9. P. 18,343–18,362.
25. Dethleff D., Loewe P., Kleine E. The Laptev Sea flaw lead – detailed investigation on ice formation and export during 1991/1992 winter season // Cold Regions Science and Technology. 1998. Vol. 27. P. 225–243.
26. Martin S., Cavalieri D.J. Contribution of the Siberian Shelf Polynyas to the Arctic Ocean Intermediate and Deep Water // Journal of Geophysical Research. 1989. Vol. 94. № C9. P. 12,725–12,738.
27. Popov A. Influence of Flaw Polynyas on Formation of Ice Cover Anomalies of the Arctic Seas // Geophysical Research Abstracts. Vol. 10. EGU2008-A-00000. 2008. EGU General Assembly.
28. Popov A., Rubchenia A. Flaw polynyas as a source of long-distance connections in climate system // Geophysical Research Abstracts. Vol. 10. EGU2008-A-00000, 2008. EGU General Assembly.

## ROLE OF THE ARCTIC FLAW POLYNYAS IN GENESIS OF NEW ICE IN THE SEAS OF THE SIBERIAN SHELF AND FRESHENING OF THE SURFACE WATERS OF THE ARCTIC OCEAN

*Estimates of daily ice growth in all the flaw polynyas of the seas of the Siberian shelf have been obtained on the basis of the methods developed by Zubov, Sabinin and Cavaliery. Calculations have been performed of the «effective» ice thicknesses for all the polynyas under consideration. Having integrated values of these «effective» ice thicknesses for the polynya areas, we have obtained estimates of ice volumes produced in the flaw polynyas of each of the seas of the Siberian shelf. Estimate of freshwater volumes accumulated in new ice, formed in the flaw polynyas, has been performed.*

*Temporal series of the ice volumes, forming annually in the polynyas of the seas of the Siberian shelf, have been obtained. Comparison of estimates, obtained by the authors using different methods with earlier data, has been conducted. Estimates of the volumes of freshwater, accumulated in ice, are given, as well as comparison of river inflow in each of the seas under consideration. The volume of freshwater, accumulated in ice formed in all the polynyas of the Kara Sea for the period November–May, equals 9–64 % of the multi-annual total river inflow in this sea. The volume of freshwater, accumulated in ice formed in all the polynyas of the Laptev Sea for the period November–May, equals 6 – 107 % of the multi-annual total river inflow in this sea. The volume of freshwater, accumulated in ice formed in all the polynyas of the East Siberian Sea for the period November–May, equals 0,3 – 115 % of the multi-annual total river inflow in this sea by the mean value of 33%.*

*Values of frequency of occurrence of episodes of polynya existence have increased from 30–70 % to 80–100 %, and area of many polynyas increased in 2–5 times. In accordance with it, volumes of ice increased, formed in the flaw leads. This increase of ice volumes at the expense of increase of polynya areas significantly exceeds influence of increased air temperatures, observed in the period of warming in the Arctic.*

*Keywords:* flaw lead, ice, freshwater balance, daily increment of ice, «efficient thickness» of ice, accumulation of fresh water, the Arctic Ocean, the Greenland Sea, the North Atlantic, climate variations.