

ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ СРОКОВ УСТОЙЧИВОГО ЛЕДООБРАЗОВАНИЯ В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ

Условия ледообразования (сроки устойчивого замерзания акватории) являются естественным природным ограничителем осенних навигационных операций на трассах Северного морского пути. Отсюда понятна необходимость прогностического предвидения режима молодых льдов, заблаговременность и форма представления которого способны повысить эффективность и безопасность при принятии рационально обоснованных и ответственных решений в условиях Крайнего Севера. Ранее был разработан метод и технология долгосрочного прогноза сроков замерзания акватории для юго-западной части Карского моря; метод прошел испытания и был рекомендован ЦМКП в качестве основного в научно-оперативной практике ААНИИ. Настоящее исследование продолжает ранее начатые работы и имеет целью распространение разработанной методики прогноза на акваторию северо-восточной части Карского моря.

Основным требованием современной гидрометеорологической продукции является картированная форма представления результатов прогноза. К сожалению, в настоящее время отсутствует какая-либо апробированная методика предвидения сроков замерзания арктических акваторий, которая позволила бы представить пространственные особенности перемещения сроков ледообразования для арктических акваторий, находящихся к востоку от Енисея. Настоящее исследование в качестве основной эвристической установки имеет цель ликвидировать этот пробел.

Географическая сложность арктических акваторий, морфометрическая неоднородность подстилающей поверхности, неравномерное распределение остаточной ледовитости, высокая степень изменчивости атмосферных процессов в осенний период делают исключительно изменчивым режим и, следовательно, сложным предвидение начальных условий замерзания арктических акваторий. Именно поэтому повышаются требования к форме, разрешающей способности, регулярности, полноте, структурной упорядоченности представления гидрометеорологической информации, необходимой для предвидения природных условий замерзания арктических морей.

Исходя из современного опыта научно-оперативной работы, наилучшее соответствие природным закономерностям наблюдается при анализе и прогнозе ледовых условий в

естественных, однородных в режимном отношении, географических таксонах. Такой подход позволяет с наибольшей полнотой воспроизвести пространственные неоднородности при прогнозировании сроков ледообразования. Локально-генетическая установка нацелена на учет местных, региональных особенностей состояния ледяного покрова в конкретных географических условиях акватории.

Основным технологическим инструментом прогноза является метод локально-генетической типизации ледовых условий, который позволяет предвидеть количественные и пространственные особенности типового распространения изохрон замерзания и нарастания льда в естественных однородных районах акватории. Для реализации этой исследовательской установки необходимо выполнить определенную последовательность действий:

- районирование акватории с целью выделения квазиоднородных ледовых районов;
- определение особенностей формирования аномалий ледообразования в однородных районах с целью получения статистических и гидрометеорологических характеристик типов замерзания акватории;
- исследование степени связанности условий ледообразования в смежных районах;
- и построение общей типизации сроков ледообразования для всего моря (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид схемы составления прогноза замерзания акватории

Исследование особенностей замерзания акватории и прогноз условий ледообразования проводится отдельно для каждого из выделенных однородных районов. Собственно прогноз для всей северо-восточной части Карского моря представляет собой объединение локальных прогнозов в однородных районах. В соответствии с рис. 1 предполагается, что технология прогноза состоит из пяти основных этапов. При этом первые четыре этапа прогноза проводятся отдельно для каждого из однородных районов, а четвертый этап является синтезом для всей акватории, состоящей из нескольких таксонов.

Однородные ледовые районы северо-восточной части Карского моря

В качестве первого шага реализации исследовательской программы и в соответствии с локально-генетическим подходом проведено районирование северо-восточной части Карского моря, на акватории которого выделено пять однородных ледовых районов (рис. 2).

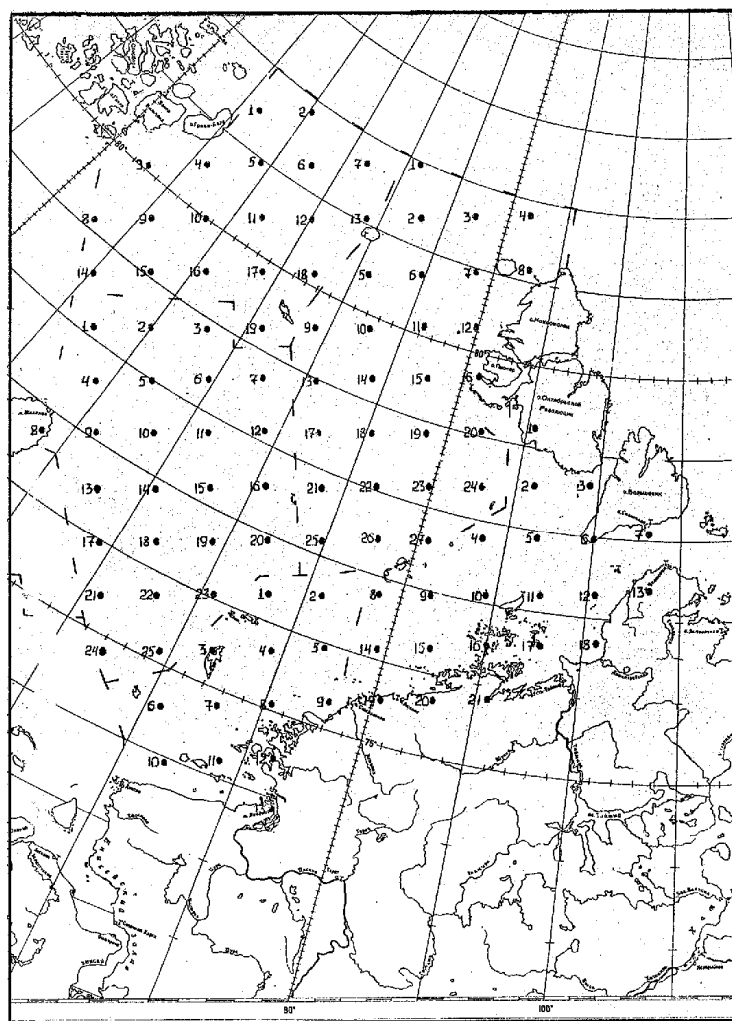


Рис. 2. Регулярная сетка для прогноза сроков замерзания и границы (пунктирная линия) между однородными ледовыми районами северо-восточной части Карского моря

Формирование ледовых условий в северо-восточной части Карского моря отличается пространственной неоднородностью в распределении характеристик ледяного покрова. Поэтому районирование акватории является обязательным предварительным этапом получения достоверной и объективной информации о состоянии льдов в море. В зависимости от особенностей распределения и изменения ледовых условий в течение летнего сезона (июнь-сентябрь) и своеобразия ледового, метеорологического и географического режима исследуемая акватория разделена на пять частей (однородных ледовых районов). Диксонский район географически тяготеет к региону морского взморья реки Пясины и прилегающей акватории. Норденшельдовский район занимает акваторию между берегом Харитона Лаптева на п-ове Таймыр и о-вами Октябрьской Революции и Большевик. Карский район пространственно ограничен мысом Желания и о-вами Визе, Уединения, Арктического Института. Североземельский район занимает часть моря к западу от Северной Земли. Наконец, Визевский район расположен между Землей Франца-Иосифа и о. Визе.

Однородный район является таксономической единицей, которая служит естественным каркасом при оформлении архива исходной информации, необходимой для прогноза сроков замерзания арктических акваторий в осенний период.

Организация архива информации о сроках замерзания акватории выполнена с учетом ледово-географической классификации морей внутри каждого из выделенных однородных районов. Шаг регулярной сетки составляет 75 км, достаточной для воспроизведения локальных особенностей режима замерзания.

Общее количество узлов регулярной сетки при делении северо-восточной части Карского моря составляет 105 единиц и распределено между таксонами моря следующим образом:

- Диксонский район – 13 узлов;
- Норденшельдовский район – 21 узел;
- Карский район – 25 узлов;
- Североземельский район – 27 узлов;
- Визевский район – 19 узлов.

Ряд наблюдений включает период с 1942 по 2000 год. Таким образом, поле сроков ледообразования каждого года представляет собой упорядоченный набор из 105 значений календарной даты замерзания. Весь архив состоит из 5670 единиц информации.

Создание архива сроков устойчивого ледообразования позволяет рассчитать основные пространственные особенности замерзания акватории. При среднемноголетних условиях ледообразование начинается на крайнем севере моря 2 сентября и заканчивается 28 октября

у мыса Желания; продолжительность перемещения “волны замерзания” составляет 56 суток, как показано на рис. 3. Столь сильная пространственная неоднородность приводит к тому, что условия замерзания существенно различаются в однородных районах моря (табл. 1), что создает исходные предпосылки для анализа гидрометеорологических особенностей циркуляционных условий ледообразования.

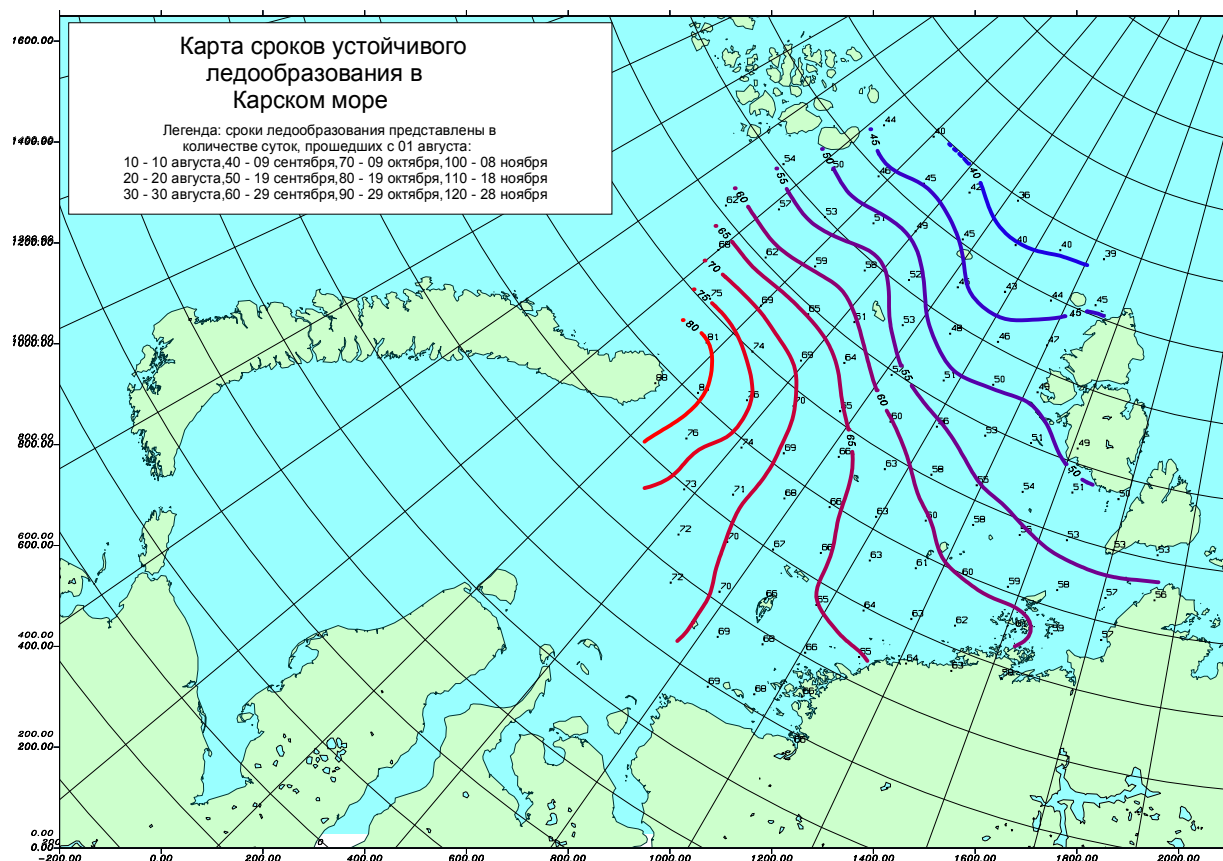


Рис. 3. Изохроны среднемноголетних сроков устойчивого ледообразования на акватории северо-восточной части Карского моря

Таблица 1

Среднемноголетние характеристики сроков замерзания акватории однородных районов северо-восточной части Карского моря

Район	Средний срок ледообразования	Начало ледообразования	Окончание ледообразования	Размах, сутки
Диксонский	6 октября	2 октября	8 октября	6
Норденшельдовский	28 сентября	18 сентября	4 октября	16
Карский	10 октября	2 октября	27 октября	26
Североземельский	19 сентября	2 сентября	2 октября	30
Визевский	20 сентября	7 сентября	6 октября	29

Наряду с общими особенностями сроков ледообразования, свойственными для всей акватории северо-восточной части Карского моря, замерзание характеризуется сильной пространственной неоднородностью по акватории однородных ледовых районов. Каждый естественный район отличается своими средними сроками начала, окончания и продолжительности ледообразования, а также средним сроком замерзания для всех регулярных узлов района. Причем все эти показатели изменяются от района к району (табл. 2). Хронологически первыми замерзают ледовые районы, расположенные на севере моря – Североземельский и Визевский. Далее ледообразование смещается к п-ову Таймыр и распространяется на акваторию Норденшельдовского района, а заканчивается на западе акватории – в Карском и Диксонском районах. Диксонский и Норденшельдовский районы отличаются относительно быстрым ледообразованием, продолжительность которого примерно в два раза меньше по сравнению с остальными акваториями. Это связано с мелководностью двух указанных таксонов и их компактным расположением вдоль побережья Таймыра.

Таблица 2

Статистические показатели среднемноголетних сроков ледообразования в однородных районах северо-восточной части Карского моря

Показатель ледообразования	Диксонский	Норден-шельдовский	Карский	Северо-земельский	Визевский
Начало замерзания	1 октября	16 сентября	30 сентября	4 сентября	7 сентября
Окончание замерзания	10 октября	4 октября	28 октября	3 октября	4 октября
Продолжительность замерзания	10 суток	18 суток	28 суток	30 суток	27 суток
Средний срок замерзания	6 октября	27 сентября	9 октября	19 сентября	21 сентября

Пространственная неравномерность замерзания акватории определяется суперпозицией нескольких факторов – теплосодержанием вод к концу летнего сезона, площадью остаточных льдов, направлением воздушных переносов осенью, интенсивностью выхолаживания подстилающей поверхности и т.д. Каждый однородный район характеризуется локальными природными особенностями, что и определяет несхожесть сроков ледообразования между естественными таксонами. Так, площадь сплоченных льдов в августе – сентябре изменяется в широком диапазоне – от 50 до 5 %, как показано на рис. 4. Это решающим образом сказывается на начале и интенсивности процесса замерзания акватории.

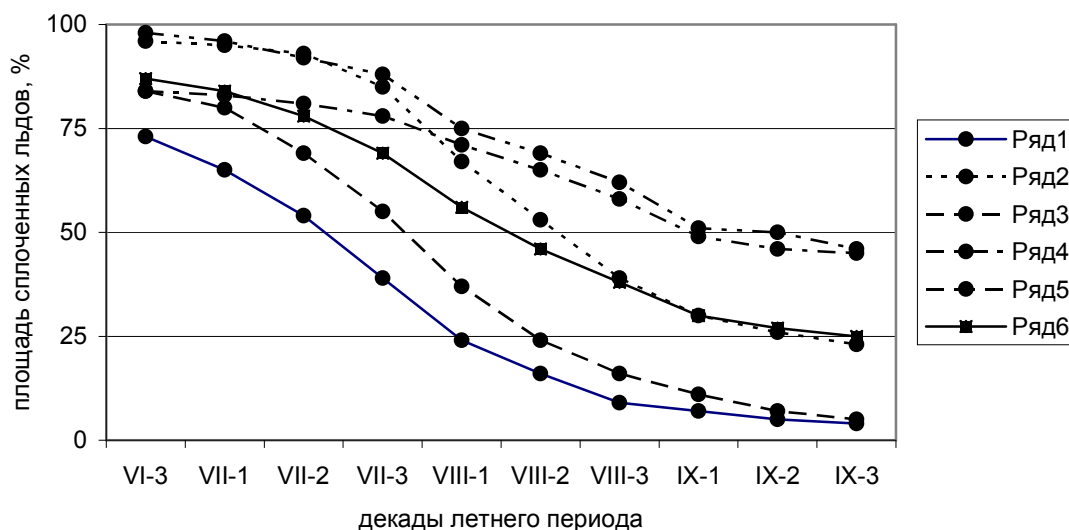


Рис. 4. Площадь сплоченных льдов в июне–сентября в однородных ледовых районах северо-восточной части Карского моря. 1 – Диксонский район; 2 – Карский район; 3 – Норденшельдовский район; 4 – Североземельский район; 5 – Визевский район; 6 – северо-восточная часть Карского моря

Формирование типовых аномалий сроков ледообразования в однородных районах северо-восточной части Карского моря

В соответствии с количественными и пространственными особенностями замерзания акватории все разнообразие сроков ледообразования в однородных районах сведено в четыре ледовых типа (табл. 3).

Каждый тип характеризуется:

- средними сроками начала ледообразования;
- средними сроками окончания ледообразования;
- продолжительностью ледообразования;
- средней датой замерзания акватории всего района;
- аномалией сроков ледообразования относительно среднеемноголетних значений.

Выделяются следующие особенности режима замерзания акватории:

- наиболее вероятным является ледообразование около среднеемноголетних сроков;
- повторяемость экстремальных типов замерзания (типы 1 и 4) меньше и они наблюдаются примерно четыре раза в 10 лет;

– экстремально раннее замерзание северо-восточной части Карского моря начинается в течение конца августа – начала сентября, а экстремально позднее – в течение первой половины октября;

– экстремально раннее замерзание юго-западной части Карского моря заканчивается в середине сентября, а экстремально позднее – в октябре–ноябре;

– в однородных районах с повышенным количеством остаточных льдов раннее замерзание акватории протекает примерно в два раза быстрее, чем позднее замерзание: 9–20 и 17–44 суток соответственно, в однородных районах с пониженным количеством остаточных льдов режим раннего и позднего замерзания примерно одинаков с близкими показателями скорости перемещения кромки молодых льдов;

– разница между средними сроками раннего и позднего замерзания составляет около одного месяца (29–36 суток).

Таблица 3

Типовые особенности ледообразования на акватории однородных районов северо-восточной части Карского моря

Тип замерзания	Повторяемость, %	Характеристики замерзания				Аномалия среднего
		начало	окончание	продолжит.	среднее	
Диксонский район						
1	13	12 сентября	24 сентября	12 суток	17 сентября	-1,70σ
2	18	21 сентября	4 октября	13 суток	27 сентября	-0,80σ
3	43	2 октября	9 октября	7 суток	6 октября	+0,06σ
4	26	13 октября	22 октября	9 суток	19 октября	+1,25σ
Норденшельдовский район						
1	13	7 сентября	16 сентября	9 суток	10 сентября	-1,47σ
2	41	13 сентября	30 сентября	17 суток	21 сентября	-0,53σ
3	31	20 сентября	9 октября	19 суток	3 октября	+0,52σ
4	15	6 октября	23 октября	17 суток	16 октября	+1,65σ
Карский район						
1	18	11 сентября	17 октября	36 суток	21 сентября	-1,44σ
2	28	24 сентября	20 октября	26 суток	4 октября	-0,44σ
3	28	6 октября	26 октября	19 суток	13 октября	+0,22σ
4	26	19 октября	14 ноября	26 суток	27 октября	+1,24σ
Североземельский район						
1	25	26 августа	16 сентября	19 суток	5 сентября	-1,11σ
2	30	29 августа	28 сентября	30 суток	12 сентября	-0,57σ
3	17	7 сентября	4 октября	27 суток	22 сентября	+0,24σ
4	28	10 сентября	16 октября	36 суток	4 октября	+1,22σ
Визевский район						
1	23	27 августа	16 сентября	20 суток	6 сентября	-1,20σ
2	38	3 сентября	1 октября	28 суток	16 сентября	-0,33σ
3	18	13 сентября	10 октября	27 суток	26 октября	+0,44σ
4	21	19 сентября	2 ноября	44 суток	9 октября	+1,59σ

Анализ гидрометеорологических показателей при формировании типов ледообразования показывает степень воздействия природных факторов, ответственных за естественную изменчивость сроков замерзания исследуемой акватории, прежде всего, среднедекадных значений температуры воздуха (табл. 4).

Таблица 4

Декадные значения температуры воздуха (°C) при различных типах замерзания в однородных ледовых районах северо-восточной части Карского моря

Тип	Район	VIII ₃	IX ₁	IX ₂	IX ₃	X ₁	X ₂	X ₃
1	Диксонский	3,7	0,7	-0,2	-2,6	-5,8	-9,9	-16,0
	Норденшельдовский	-0,9	-2,7	-4,3	-4,0	-7,0	-10,4	-17,3
	Карский	-0,5	-1,4	-3,0	-5,8	-8,7	-12,5	-15,9
	Североземельский	-1,2	-2,8	-4,6	-6,1	-9,4	-14,6	-20,9
	Визевский	-1,1	-2,7	-3,8	-6,0	-9,0	-14,6	-20,9
	<i>Среднее</i>	0,0	-1,8	-3,2	-4,9	-8,0	-12,4	-18,2
2	Диксонский	3,6	3,2	0,8	-1,8	-4,9	-10,8	-14,0
	Норденшельдовский	-0,1	-0,7	-2,3	-4,9	-8,6	-12,2	-16,6
	Карский	-1,0	-1,5	-2,4	-3,7	-6,7	-10,5	-14,4
	Североземельский	-1,2	-2,0	-3,6	-7,2	-10,1	-13,5	-17,8
	Визевский	-1,1	-2,0	-2,8	-5,6	-8,4	-13,5	-17,8
	<i>Среднее</i>	-0,0	-0,6	-2,1	-4,6	-7,7	-12,1	-16,1
3	Диксонский	4,2	3,4	1,6	-0,2	-4,3	-6,9	-12,0
	Норденшельдовский	1,3	0,4	-0,7	-2,5	-4,9	-8,8	-12,0
	Карский	0,6	0,0	-0,8	-1,9	-4,5	-7,9	-13,7
	Североземельский	0,0	-1,6	-2,0	-4,2	-7,7	-10,8	-12,6
	Визевский	-0,2	-0,6	-1,6	-3,1	-7,4	-10,8	-12,6
	<i>Среднее</i>	1,2	0,3	-0,7	-2,4	-5,8	-9,0	-12,6
4	Диксонский	5,2	3,5	2,5	1,5	-0,8	-3,9	-9,3
	Норденшельдовский	0,4	0,2	-0,4	-0,7	-2,3	-4,6	-10,7
	Карский	0,7	-0,1	-0,3	-0,8	-1,6	-4,4	-8,3
	Североземельский	-0,2	-1,3	-1,8	-2,6	-5,1	-9,3	-14,3
	Визевский	0,0	-1,3	-1,9	-2,2	-4,0	-9,3	-14,3
	<i>Среднее</i>	1,2	0,2	-0,4	-1,0	-2,8	-6,3	-11,4

Как видно, температура воздуха, характеризующая интенсивность выхолаживания подстилающей поверхности, оказывает решающее влияние на формирование типового сценария ледообразования в однородных районах. В общем случае наблюдается следующее правило: чем раньше температура воздуха опустится до некоторой критической отметки, тем раньше начинается замерзание моря. Причем, чем позже происходит устойчивое ледообразование, тем при более низкой температуре воздуха оно происходит (табл. 5). Так, если акватория замерзает в начале сентября, то это происходит при температуре около -2,7 °C, а если акватория замерзает в конце сентября, то это происходит при температуре около -4,0 °C.

Таблица 5

**Осредненные декадные значения температуры воздуха (°C) до, в момент и после типового
замерзания в однородных районах северо-восточной части Карского моря**

Декада среднего замерзания в районе	Одна декада до замерзания	Непосредственно декада замерзания	Одна декада после замерзания
IX ₁	–1,1	–2,7	–4,2
IX ₂	–1,8	–3,1	–6,2
IX ₃	–2,1	–4,0	–7,6
X ₁	–2,3	–4,6	–8,0
X ₂	–2,0	–4,5	–9,5

Как и следовало ожидать, наблюдается хорошая корреляция между сентябрьской ледовитостью в однородных районах и сроком замерзания акватории (табл. 6). Выделяется общее режимное правило: чем больше остаточных льдов в море, тем раньше акватория замерзает. Тип сроков устойчивого ледообразования напрямую связан с площадью льдов осенью.

Таблица 6

**Ледовитость (%) и среднемесячные аномалии (σ) температуры воздуха в однородных районах
северо-восточной части Карского моря при различных типах замерзания акватории**

Тип	Район	Ледовитость, %		Аномалия температуры (доли с.к.о.)	
		фактическая	аномалия	сентябрь	октябрь
1	Диксонский	68	+46	–1,42	–0,89
	Норденшельдовский	88	+35	–1,07	–0,36
	Карский	70	+48	–0,19	–0,91
	Североземельский	91	+22	–0,56	–0,84
	Визевский	96	+23	–0,87	–0,31
	<i>Среднее</i>	83	+41	–0,82	–0,66
2	Диксонский	47	+25	–0,52	–0,68
	Норденшельдовский	69	+16	–0,33	–0,62
	Карский	32	+10	–0,51	–0,41
	Североземельский	85	+16	–0,45	–0,45
	Визевский	84	+11	–0,34	–0,47
	<i>Среднее</i>	63	+16	–0,43	–0,53
3	Диксонский	6	–16	+0,10	0,00
	Норденшельдовский	25	–28	+0,59	+0,54
	Карский	2	–20	+0,51	+0,13
	Североземельский	70	+1	+0,55	+0,48
	Визевский	50	–23	+0,87	–0,02
	<i>Среднее</i>	31	–17	+0,52	+0,23
4	Диксонский	0	–22	+0,75	+0,92
	Норденшельдовский	10	–43	+0,99	+1,32
	Карский	3	–19	+0,85	+1,15
	Североземельский	35	–34	+0,99	+0,68
	Визевский	44	–29	+0,85	+1,12
	<i>Среднее</i>	18	–29	+0,89	+1,04

В результате обобщения всех типов замерзания получены следующие соотношения, характерные для однородных районов северо-восточной части Карского моря.

1. Тип замерзания 1 (экстремально раннее ледообразование) – формируется, когда аномалия ледовитости в сентябре составляет в среднем +41 %.

2. Тип замерзания 2 (умеренно раннее ледообразование) – формируется, когда аномалия ледовитости в сентябре составляет в среднем +16 %.

3. Тип замерзания 3 (умеренно позднее ледообразование) – формируется, когда аномалия ледовитости в сентябре составляет в среднем –17 %.

4. Тип замерзания 4 (экстремально позднее ледообразование) – формируется, когда аномалия ледовитости в сентябре составляет в среднем –29 %.

Таким образом, тяжелые ледовые условия летнего периода определяют ранний фон осенних явлений. Напротив, легкие ледовые условия летнего периода определяют поздний фон осенних явлений. Это обстоятельство увеличивает заблаговременность предвидения при аномальном развитии ледовых условий.

Типы замерзания 1 и 2 формируются при повышенной остаточной ледовитости на акватории однородных районов. Напротив, типы замерзания 3 и 4 формируются при пониженной остаточной ледовитости на акватории однородных районов. В свою очередь, разделение типов 1 и 2 происходит в зависимости от интенсивности осеннего выхолаживания, так же, как и разделение типов 3 и 4.

Анализ направления и интенсивности воздушных переносов осенью показал, что именно особенности атмосферной циркуляции формируют аномалии температуры воздуха и сроков ледообразования в море (табл. 7). В качестве показателей приземного ветра использовались значения разницы давления воздуха между пунктами наблюдений на характерных створах.

1. Для Диксонского района репрезентативным створом была выбрана пара п/ст. о. Диксон – мыс Стерлегова.

2. Для Норденшельдовского района репрезентативным створом была выбрана пара п/ст. мыс Стерлегова – мыс Челюскин.

3. Для Карского западного района репрезентативным створом была выбрана пара п/ст. мыс Желания – о. Уединения.

4. Для Карского восточного района репрезентативным створом была выбрана пара п/ст. о. Уединения – о. Средний.

5. Для Визевского района репрезентативным створом была выбрана пара п/ст. о. Хейса – о. Визе.

**Аномалии приземного давления (σ) на характерных створах при различных типах замерзания
акватории однородных районов северо-восточной части Карского моря**

Тип	Район	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
1	Диксонский	0,52	-0,88	-1,02	-2,78	0,04
	Норденшельдовский	1,04	0,92	-0,42	-2,82	0,34
	Карский	0,53	-1,07	-1,74	-3,46	-2,30
	Североземельский	0,58	0,22	-0,76	-2,12	0,03
	Визевский	0,67	-0,44	-1,00	-1,60	-0,97
	<i>Среднее</i>	0,67	-0,25	-0,99	-2,56	-0,57
2	Диксонский	-1,29	-1,43	-0,57	-2,23	-1,91
	Норденшельдовский	0,50	-0,43	-0,78	-2,14	-1,39
	Карский	-0,35	-0,70	-0,78	-2,55	-3,25
	Североземельский	0,46	-1,00	-0,80	-1,44	-2,01
	Визевский	-0,11	-0,89	-0,80	-1,91	-2,67
	<i>Среднее</i>	-0,16	-0,89	-0,75	-2,05	-2,25
3	Диксонский	-0,25	-0,72	-0,99	-0,74	-0,96
	Норденшельдовский	-1,39	-1,55	-1,06	-0,43	-1,00
	Карский	0,13	-1,35	-0,65	-1,94	-2,59
	Североземельский	-0,03	0,53	-1,37	-1,17	-0,87
	Визевский	-0,73	-0,44	1,49	-2,21	-3,54
	<i>Среднее</i>	-0,45	-0,71	-0,52	-1,30	-1,79
4	Диксонский	-0,09	-0,45	-0,78	-1,60	-1,04
	Норденшельдовский	-0,05	-1,08	-1,35	-2,42	-2,85
	Карский	0,75	-0,07	-0,96	-2,08	-3,08
	Североземельский	0,09	-0,84	-0,63	-0,92	-1,17
	Визевский	-0,54	-1,40	-1,56	-2,14	-1,34
	<i>Среднее</i>	0,03	-0,77	-1,06	-1,83	-1,90

Указанные показатели исчерпывающим образом характеризуют особенности воздушных переносов над акваторией однородных районов: знак разности и ее модуль показывают, во-первых, преобладание циклонической или антициклонической циркуляции, и, во-вторых, интенсивность преобладающей циркуляции.

Анализ показывает основные циркуляционные особенности формирования типов замерзания акватории. Установлено, что тип 1 экстремально раннего ледообразования образуется при антициклонической циркуляции в течение августа и ослабленной циклонической циркуляции в течение сентября. Именно при таких природных условиях происходит повышенное выхолаживание подстилающей поверхности, и формируются экстремальные отрицательные аномалии температуры воздуха в августе и в сентябре. Основное отличие типа 1 от типа 2 (оба типа характеризуются повышенной остаточной ледовитостью) состоит в том, что в августе и в сентябре в типе 2 наблюдается большая интенсивность циклонической циркуляции (рис. 5), что сопровождается относительно повышенными значениями температуры воздуха, и, следовательно, более поздним ледообразованием.

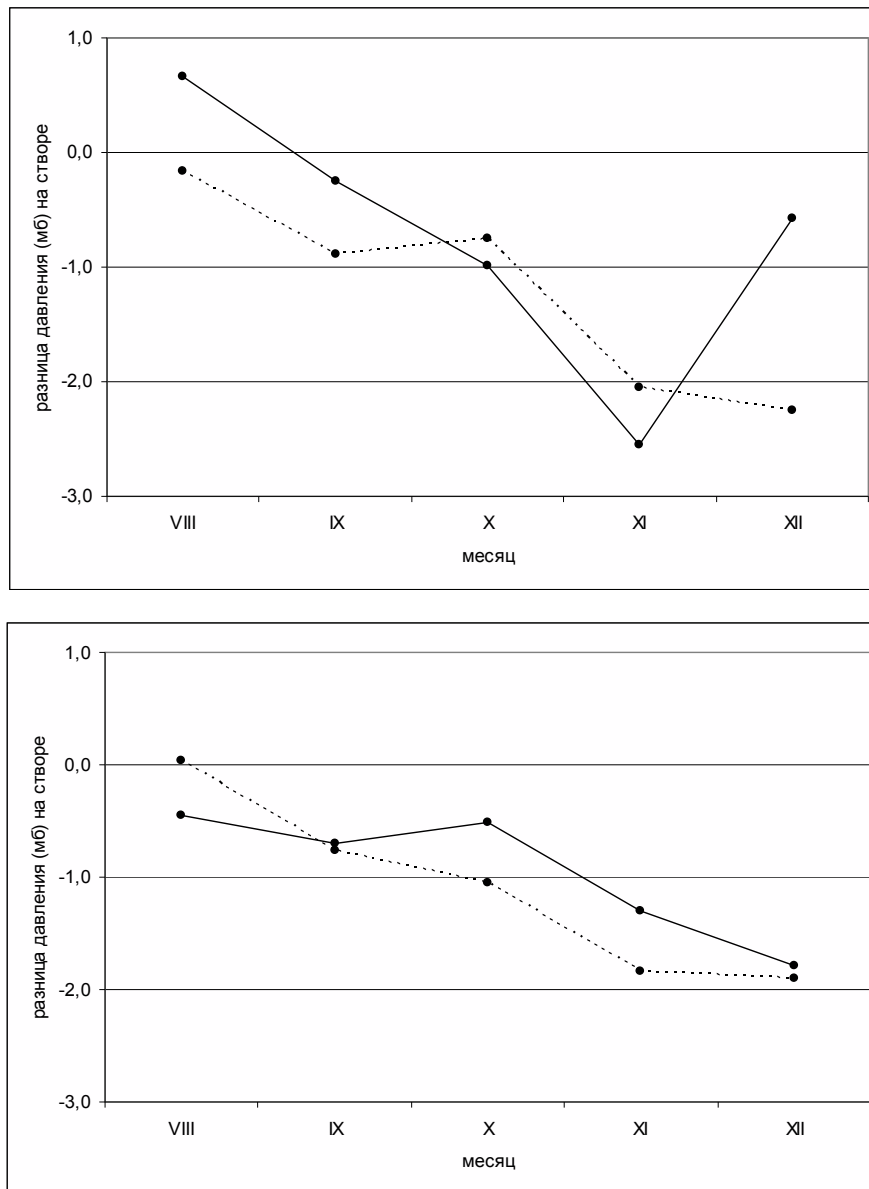


Рис. 5. Разница давления на створах в северо-восточной части Карского моря.

вверху: тип 1 – сплошная линия, тип 2 – пунктирная линия,

внизу: тип 3 – сплошная линия, тип 4 – пунктирная линия

При пониженной остаточной ледовитости наблюдаются свои характерные, режимные особенности. Тип 3 умеренно позднего замерзания образуется при ослабленной циклонической циркуляции в течение октября и ноября; напротив, тип 4 экстремально позднего замерзания образуется при усилении циклонической циркуляции в течение октября и ноября. Основное отличие типа 4 от типа 3 (оба типа характеризуются пониженной остаточной ледовитостью) состоит в том, что поздней осенью в типе 4 наблюдается большая интенсивность циклонической циркуляции, что сопровождается относительно повышенными значениями температуры воздуха, и, следовательно, более поздним ледообразованием.

В качестве примера приведем характерную карту распределения приземного давления воздуха при усилении антициклонической циркуляции, т.е. при развитии арктического антициклона из Арктики на Баренцево и Карское моря, что приводит к формированию отрицательных аномалий температуры воздуха (рис. 6).

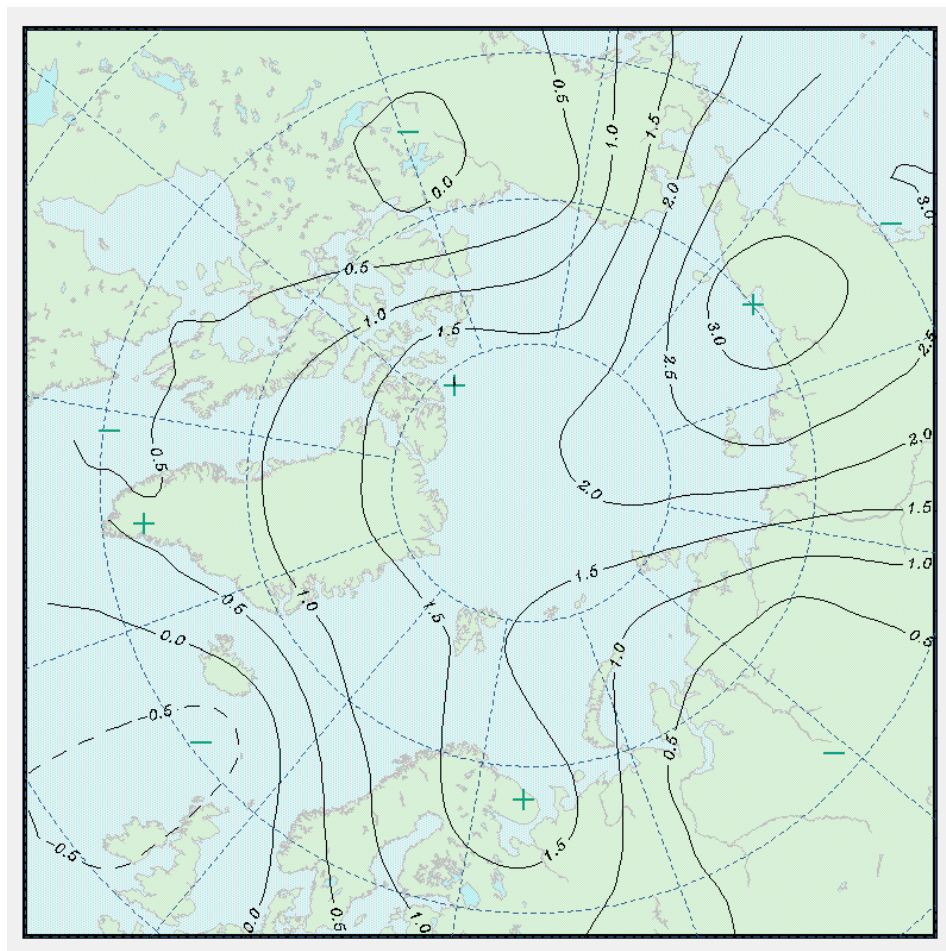


Рис. 6. Распределение аномалий приземного давления воздуха в октябре при anomalно раннем ледообразовании в Диксонском районе северо-восточной части Карского моря

Таким образом, при формировании типа замерзания активно действуют три основные природные предиктора:

1. во-первых, остаточная ледовитость в сентябре определяет общий фон развития осенних явлений; повышенная ледовитость формирует условия раннего ледообразования, а пониженная – позднего;
2. на исходный фон ледовитости накладываются особенности атмосферной циркуляции; атмосфера может характеризоваться или преобладанием антициклоничности

или преобладанием циклоничности (в свою очередь, циклоничность может быть большей или меньшей интенсивности);

3. атмосферная циркуляция связана со скоростью выхолаживания подстилающей поверхности, что выражается в формировании аномалий (отрицательных и положительных) приземной температуры воздуха.

Антициклоническая циркуляция с отрицательными аномалиями температуры при повышенной остаточной ледовитости приводит к формированию сценария экстремально раннего замерзания. Напротив, циклоническая циркуляция с положительными аномалиями температуры при пониженной ледовитости приводит к формированию сценария экстремально позднего замерзания. Умеренно аномальное замерзание формируется при сочетании противоположных тенденций в развитии осенних процессов.

Выполненный анализ показывает, что формирование типа осеннего замерзания акватории однородных районов северо-восточной части Карского моря является многофакторным явлением, зависящим от комбинации аномалий предикторов, определяющих изменчивость сроков ледообразования (табл. 8).

Таблица 8

Схема формирования прогностического типа ледообразования в однородных районах северо-восточной части Карского моря

Остаточная ледовитость	Аномалия атмосферной циркуляции	Аномалия температуры воздуха	Тип ледообразования
Повышенное количество остаточных льдов	Антициклоническая циркуляция	Экстремальные отрицательные аномалии	1
	Слабая циклоническая циркуляция	Умеренные отрицательные аномалии	2
Пониженное количество остаточных льдов	Слабая циклоническая циркуляция	Умеренные положительные аномалии	3
	Усиленная циклоническая циркуляция	Экстремальные положительные аномалии	4

Закономерности формирования и изменчивости аномалий гидрометеорологических условий определяют оптимальные сроки составления прогноза замерзания акватории: в середине и второй половине сентября при заблаговременности прогноза около одного – полутора месяцев.

Разработанный метод прогноза опирается на исходное состояние ледяного покрова и ожидаемое развитие метеорологических процессов, однако не учитывает характеристики водных масс к началу ледообразования. Отсутствие гидрологической информации определяется современным состоянием наблюдательной сети. К тому же, в относительно мелководных морях (к которым относится акватория сибирского шельфа) решающее

воздействие на изменчивость сроков ледообразования оказывают, прежде всего, остаточная ледовитость и интенсивность выхолаживания подстилающей поверхности; отметим также, что ожидаемые особенности атмосферной циркуляции в косвенном виде учитывают и тепловое состояние акватории моря.

Связанность условий ледообразования между смежными районами

Анализ формирования аномалий сроков ледообразования выполнен отдельно для пяти районов. Каждому ледовому району соответствуют характерные сроки ледообразования и особенности распространения по акватории изохрон замерзания. Наряду с особенностями, присущими отдельному району, имеются признаки, общие для всех районов и позволяющие говорить об известном сходстве процесса замерзания на всей акватории. Это, прежде всего, теснота связи между показателями сроков ледообразования однородных районов. Обычно раннее ледообразование в каком-либо одном районе сопровождается также ранним ледообразованием и в других акваториях, и наоборот. При этом, анализ показывает, что наиболее тесная связь наблюдается между показателями среднего срока ледообразования, в то время как для показателей начала и окончания замерзания в районе показатели связи заметно слабее (табл. 9–11).

Таблица 9

Коэффициенты корреляции между сроками начала устойчивого ледообразования в однородных ледовых районах северо-восточной части Карского моря

Районы	Норденшельдовский	Карский	Североземельский	Визевский
Диксонский	0,66	0,78	0,32	0,39
Норденшельдовский	—	0,55	0,42	0,50
Карский	—	—	0,41	0,54
Североземельский	—	—	—	0,86

Таблица 10

Коэффициенты корреляции между сроками окончания устойчивого ледообразования в однородных ледовых районах северо-восточной части Карского моря

Районы	Норденшельдовский	Карский	Североземельский	Визевский
Диксонский	0,82	0,51	0,78	0,51
Норденшельдовский	—	0,37	0,81	0,49
Карский	—	—	0,51	0,63
Североземельский	—	—	—	0,69

Коэффициенты корреляции между средними сроками устойчивого ледообразования в однородных ледовых районах северо-восточной части Карского моря

Районы	Норденшельдовский	Карский	Североземельский	Визевский
Диксонский	0,87	0,80	0,77	0,54
Норденшельдовский	—	0,64	0,84	0,53
Карский	—	—	0,68	0,71
Североземельский	—	—	—	0,76

Наличие тесной связи между показателями замерзания показывает, что анализ и прогноз условий замерзания моря может не только ограничиваться естественными границами однородных ледовых районов, но и выходить за их пределы, т.е. возможно построение типовых карт для всей суммарной акватории северо-восточной части Карского моря и использование полученных шаблонов для заблаговременного предвидения сроков замерзания акватории.

В качестве иллюстрации на рис. 7 приведена типовая карта для лет с крупной отрицательной аномалией сроков ледообразования. Для сравнения на рис. 8 приведена другая типовая карта, также для случая раннего замерзания, но для выборки лет со значимой, но не крупной аномалией сроков устойчивого ледообразования. Хорошо наблюдаются характерные различия в пространственном перемещении изохрон замерзания. Аналогичным образом можно иллюстрировать случаи позднего замерзания – с крупной аномалией сроков устойчивого ледообразования и со значимой, но не крупной аномалией; также отмечаются типовые различия в пространственном положении изохрон замерзания.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что типовые карты-схемы изохрон ледообразования могут успешно и эффективно использоваться для анализа и прогноза как для акватории отдельных ледовых районов, так и для всей северо-восточной части Карского моря, т.е. типовыми условиями может быть описано не только ледообразование в отдельных однородных районах, но и вся акватория северо-восточной части Карского моря без деления на составляющие таксоны.

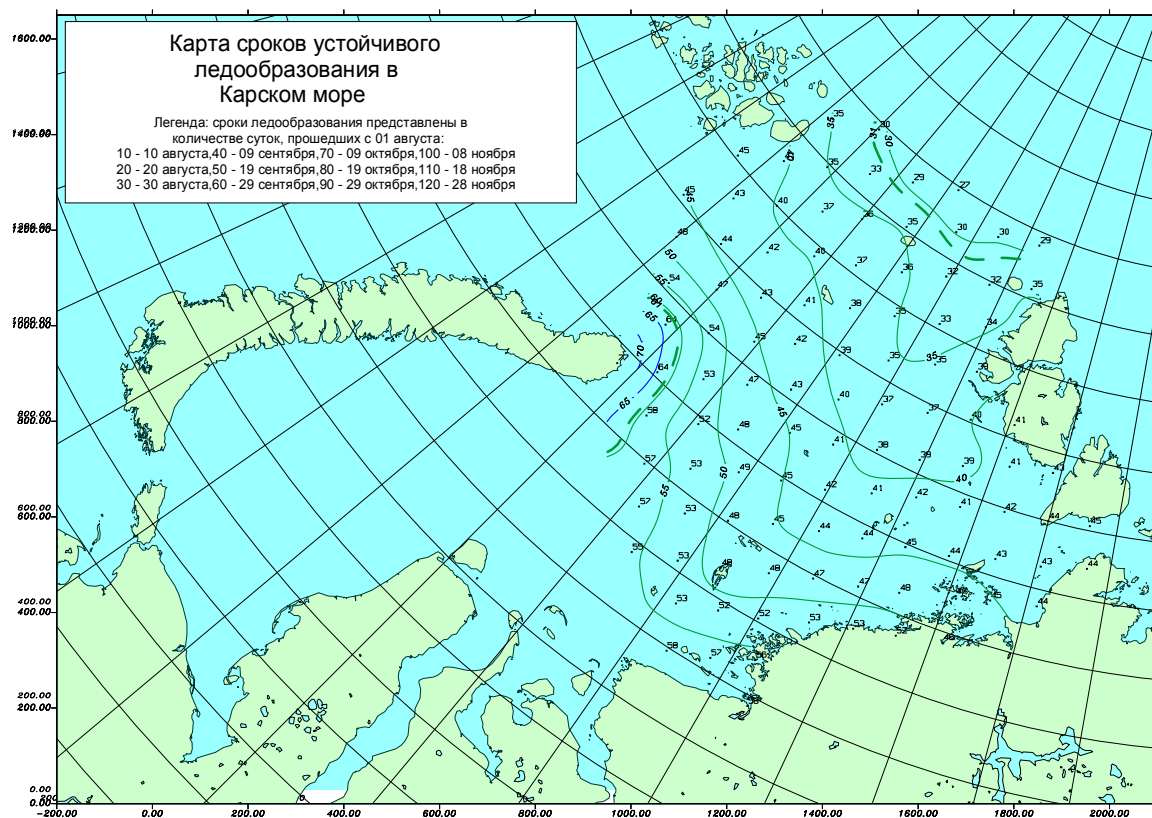


Рис. 7. Сроки ледообразования при anomalously раннем замерзании акватории северо-восточной части Карского моря

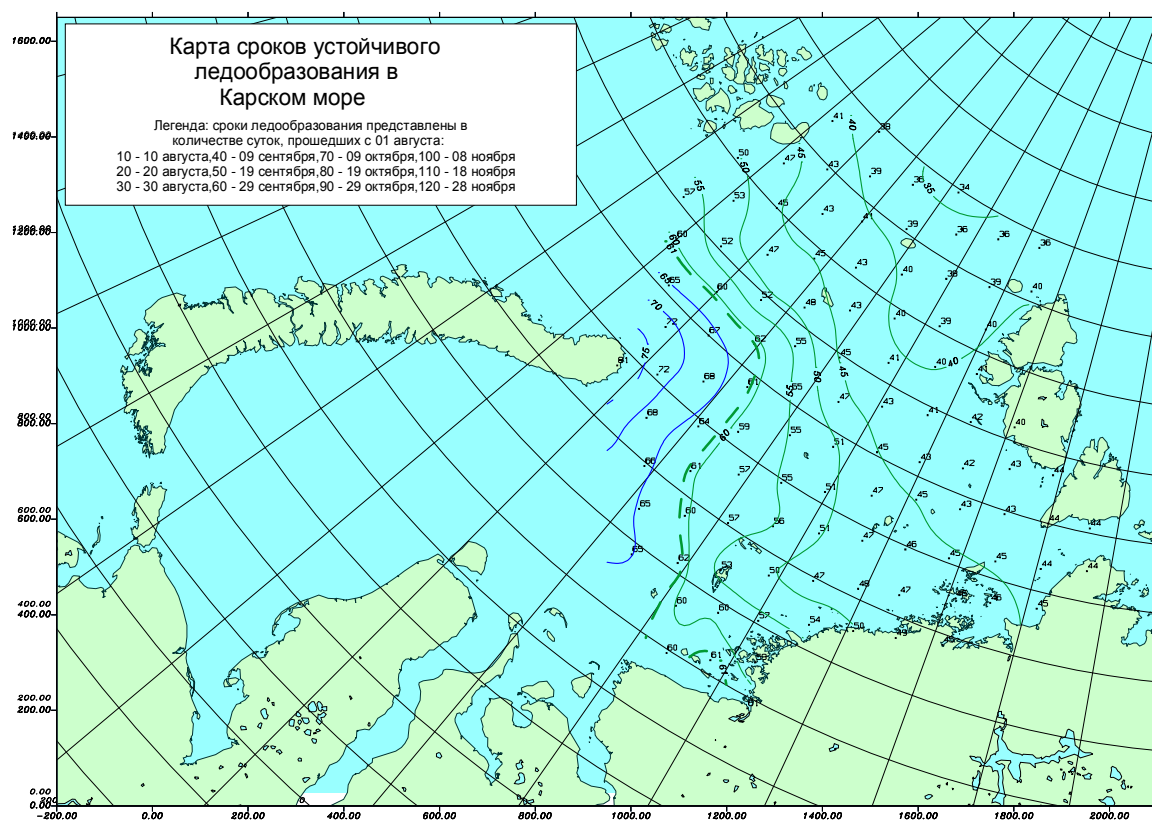


Рис. 8. Сроки ледообразования при умеренно раннем замерзании акватории северо-восточной части Карского моря

Методическая обеспеченность типовых значений сроков ледообразования в однородных районах северо-восточной части Карского моря

В результате выполненного анализа установлено, что с помощью локально-генетической типизации сроков замерзания акватории можно составить две методики предвидения осенних условий в море:

1. прогноз пространственного распределения изохрон типовых сроков устойчивого ледообразования отдельно по акватории каждого из пяти однородных районов;
2. прогноз пространственного распределения изохрон типовых сроков устойчивого ледообразования в целом для всей акватории северо-восточной части Карского моря.

При этом прогноз для однородных районов является основным, наиболее полно учитывающим локальные особенности ледового режима; второй прогноз, составляемый при необходимости (сразу для всей акватории) можно рассматривать как ориентировочный, описывающий общие тенденции пространственных особенностей распределения изохрон замерзания.

Собственно процедура прогнозирования заключается в отнесении ледовых условий однородного района в прогностическом году к одному из 4-ех типов сроков устойчивого ледообразования. Исходная ледовитость на начало сентября является известной величиной, а значения температуры воздуха и разность давления на створах берется из фонового метеорологического прогноза, составляемого в отделе долгосрочных метеорологических прогнозов ААНИИ. Разделение по типам замерзания происходит в соответствии с данными табл. 4, 6, 7. Каждому типу соответствует средняя карта сроков устойчивого ледообразования. На первом этапе определяется ожидаемый тип для каждого из пяти районов, на втором этапе на основании этих локальных прогнозов составляется обобщенный прогноз для всей акватории северо-восточной части Карского моря.

При развитии природных процессов по неожиданному варианту прогноз может быть изменен или уточнен. При этом заблаговременность прогноза может уменьшиться (при раннем замерзании) или остаться прежней (при позднем замерзании).

Эффективность разработанных технологий предвидения заключается в разнице между методической и климатической обеспеченностью прогнозируемых показателей. Так как данная методика относится к разряду долгосрочных прогнозов, то критерием оценки является отклонение от среднего на величину $0,8\sigma$.

Определение эффективности выполнено для прогноза осенних условий отдельно для однородных районов акватории. Для прогнозируемых значений сроков ледообразования

сравнивались показатели методической и климатической обеспеченности в однородных районах по узлам регулярной сетки (табл. 12).

Таблица 12

Обеспеченность (%) прогностических значений типовых сроков ледообразования в однородных районах северо-восточной части Карского моря

Район	Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Среднее	Климатич. обеспеченность	Эффективность
Диксонский	88	97	96	97	95	60	+35
Норденшельдовский	97	93	93	93	93	55	+38
Карский	90	93	98	86	92	61	+31
Североземельский	98	95	90	88	93	51	+42
Визевский	95	86	90	80	88	58	+30
СВКМ	94	93	93	89	92	57	+35

В целом, методическая обеспеченность достаточно высока и составляет для однородных районов от 88 до 95 %, а для типов ледообразования от 89 до 94 %. Таким образом, разработанная методика и технология долгосрочного прогноза сроков ледообразования в однородных районах северо-восточной части Карского моря является достаточно эффективной по сравнению со среднемноголетним сценарием состояния ледяного покрова и адекватно описывает межгодовую изменчивость ледовых условий в период замерзания акватории.

Результаты оперативных испытаний метода

Испытание метода проводилось в отделе ледового режима и прогнозов ГУ «АНИИ» в период с августа 2006 по декабрь 2009 года. Прогнозы составлялись и оценивались для северо-восточной части Карского моря, мористая граница которой проходит по линии о. Диксон – мыс Желания и мыс Желания – о. Грэм-Белл. В юго-западной части моря прогнозы составлялись отдельно для каждого из пяти однородных ледовых районов (Диксонский, Норденшельдовский, Карский, Североземельский, Визевский). Элементарной единицей прогностического поля является узел регулярной сетки с шагом 75 км, всего на прогнозируемой акватории расположен 105 таких узлов. Прогноз для северо-восточной части Карского моря является результатом режимного объединения частных прогнозов для локальных районов.

Всего за период испытаний было составлено четыре долгосрочных прогноза замерзания акватории однородных районов северо-восточной части Карского моря. Предметом прогноза является срок устойчивого ледообразования в узлах регулярной сетки,

на основе которых строится прогностическая карта последовательного перемещения изохрон замерзания по пространству акватории.

Оправдываемость прогнозов за период испытаний приведена в табл. 13. Как видно, оправдываемость прогнозов сроков устойчивого ледообразования в среднем за 4 года составила 73 %, при природной обеспеченности 57 % (эффективность + 16 %).

Таблица 13

Оправдываемость и эффективность (%) долгосрочных прогнозов сроков устойчивого ледообразования в северо-восточной части Карского моря в 2006-2009 гг.

Год	Оправдываемость	Эффективность
2006	66	+9
2007	83	+26
2008	75	+18
2009	67	+10
Среднее	73	+16

Оправдываемость прогнозов оценивалась согласно Наставлению [1]. При прогнозе срока ледообразования в узле регулярной сетки оценку 100 % получал прогноз, ошибка которого составляла менее $0,8\sigma$, где σ – среднеквадратическое отклонение срока ледообразования в данном узле от среднего значения; оценку 0 % получал прогноз, ошибка которого составляла более $0,8\sigma$. Осреднением прогнозов для каждого узла определялась оправдываемость прогноза как для акватории однородного района, так и для всей северо-восточной части Карского моря.

В настоящее время отсутствует долгосрочный метод прогноза, который позволял бы с заблаговременностью более 1 месяца предвидеть пространственные особенности распространения изохрон замерзания в северо-восточной части Карского моря. Обычно прогнозируется срок замерзания акватории в какой-либо конкретной точке (например полярная станция). Особенность испытываемого метода заключается в том, что появляется возможность прогноза срока ледообразования не только в отдельной точке, но и по пространству моря.

Оправдываемость испытываемого физико-статистического метода прогноза зависит от качества исходной информации, надежности идентификации начальных условий состояния ледяного покрова в конце летнего периода (август–сентябрь) и точности ожидаемого изменения метеорологических условий в октябре–ноябре. В связи с ухудшением в последние годы надежности данных гидрометеорологической сети, прекращением авиационных ледовых разведок и относительно невысокой отечественной технологией спутниковых наблюдений качество исходной информации о состоянии

ледяного покрова не всегда удовлетворительно. Это неизбежно сказывается на надежности идентификации начальных ледовых условий.

Зависимость изменчивости сроков замерзания акватории от синхронных метеорологических процессов синоптического характера приводит к уменьшению оправдываемости прогнозов при увеличении их заблаговременности.

Испытываемый метод позволяет прогнозировать сроки устойчивого ледообразования в узлах регулярной сетки в северо-восточной части Карского моря заблаговременностью более 1 месяца. Метод характеризуется достаточной эффективностью по сравнению с климатическими оценками.

Учитывая результаты проведенных испытаний, Центральная методическая комиссия по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета в своем решении от 25 июня 2010 года одобрила работу ГУ «ААНИИ» по созданию метода долгосрочного прогноза сроков устойчивого ледообразования в северо-восточной части Карского моря.

Комиссия рекомендовала ГУ «ААНИИ»:

- внедрить метод долгосрочного прогноза сроков устойчивого ледообразования в северо-восточной части Карского моря в оперативную практику ГУ «ААНИИ» в качестве основного;
- обеспечить своевременную передачу методических прогнозов в Северное и Мурманское УГМС для эффективного использования в оперативно-прогностической практике;
- продолжить работу по усовершенствованию метода с учетом высказанных на ЦМКП замечаний и включать карту изохрон ледообразования для Карского моря в официальный долгосрочный прогноз ГУ «ААНИИ» ледовых условий в арктических морях на вторую половину навигации, начиная с августа 2010 года.

Список литературы

1. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 143 с.