



003064234

На правах рукописи

Думанская Ирина Олеговна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ
И ПРОГНОЗ ХАРАКТЕРИСТИК ДРЕЙФУЮЩЕГО ЛЬДА
В БЕЛОМ МОРЕ**

**Специальность 25.00.30 –
метеорология, климатология, агрометеорология**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук**

1 2 ИЮЛ 2007

Москва – 2007

Работа выполнена в Государственном Учреждении
«Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации»

Научные руководители	кандидат географических наук З К Абузьяров
	доктор географических наук, профессор З М Гудкович
Официальные оппоненты:	доктор географических наук, профессор А Н Косарев
	кандидат географических наук Г К Веселова
Ведущая организация:	Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ)

Защита состоится 30 мая 2007 г в 14 часов на заседании диссертационного
Совета Д 327 003 01 Гидрометеорологического научно-исследовательского
центра Российской Федерации по адресу
123242, Москва Большой Предтеченский пер , 11-13,
Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской
Федерации

Автореферат разослан 27 апреля 2007 г

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор географических наук

 Е С Нестеров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Ледовый покров Белого моря является одной из наиболее важных характеристик состояния поверхности моря. Его исследование представляет не только научный, но и большой практический интерес для мореплавания. В связи с интенсивным развитием районов Крайнего Севера в Белом море регулярно проводятся морские операции, поддерживается круглогодичный режим навигации.

Влияние льда на плавание судов в Белом море намного превышает суммарный эффект воздействия всех остальных природных явлений. Дрейфующий лед оказывает значительное сопротивление движению судов, однако в связи с высокой пространственной неоднородностью и большой временной изменчивостью его распределения, это сопротивление можно существенно уменьшить за счет плавания по наилегчайшим маршрутам.

Недооценка ледовых условий при осуществлении мореплавания в ледовый период может иметь серьезные последствия, связанные с экономическими потерями при вынужденных простоях караванов и механическими повреждениями судов. Особенно опасно плавание во льдах большегрузных танкеров, круглый год транспортирующих нефть Тимано-Печорского месторождения по беломорским трассам.

Несмотря на большое количество работ по различным ледовым проблемам Белого моря, некоторые вопросы его ледового режима остаются недостаточно изученными. Среди них – исследование межгодовой и внутрисезонной изменчивости площадных ледовых характеристик дрейфующего ледяного покрова, взаимосвязи метеорологических процессов с ледовым режимом, особенностей перераспределения характеристик дрейфующего льда в Белом море.

В архивах Гидрометцентра России и Северного УГМС хранятся данные ледовых авиационных разведок по Белому морю более чем за 50-летний период наблюдений, однако эта информация используется исследователями достаточно редко в силу большой трудоемкости площадной оцифровки ледовых характеристик. С начала 90-х гг. XX века систематические авиаразведки полностью прекращены. Тем не менее, их данные, являясь единственным видом площадной информации о дрейфующих льдах в 50-80-х гг. XX века, по достоверности, системности и подробности не уступают современной спутниковой информации среднего разрешения. В настоящее время, когда в обращении у специалистов имеются мощные и доступные вычислительные средства, необходимо осуществить обработку карт ледовых авиаразведок с целью создания банков данных и получения качественного климатического материала.

Современная технология обслуживания мореплавания в ледовый период основана на реализации комплексного подхода, включающего

использование климатических представлений, анализе спутниковой информации и данных гидрометеорологических станций, а также интерпретации результатов модельных расчетов и прогнозов. Учет фактических и прогнозируемых ледовых условий существенно уменьшает риск плавания во льдах и оптимизирует использование ледоколов.

Разработка метода расчета и прогноза перераспределения льда в Белом море должна способствовать созданию возможности для более полного удовлетворения потребностей судоводителей в специализированной ледовой информации. Актуальной также остается проблема дешифрирования спутниковых данных. Расчет с помощью модели сплоченности и толщины льда по фактическим значениям метеоэлементов важен для верной оценки ледовой обстановки, наблюдаемой с ИСЗ.

Цель исследования – изучение изменчивости ледовых характеристик дрейфующего льда Белого моря и создание метода расчета и прогноза перераспределения дрейфующего льда на основе математического моделирования ледовых процессов. Для достижения этой цели решались следующие основные задачи:

- Анализ связи характеристик макромасштабной атмосферной циркуляции и ледового режима Белого моря
- Построение комплекта климатических ледовых карт.
- Уточнение рекомендаций для плавания судов в ледовый период
- Разработка метода расчета и прогноза перераспределения льда в Белом море на основе адаптации гидродинамической модели Ю. П. Доронина для Карского моря к акватории Белого моря и использования эмпирико-статистических зависимостей

Научная новизна. Все результаты диссертации получены впервые, а именно:

1. Выполнено комплексное исследование ледового режима Белого моря, включающее детальный анализ пространственной и временной изменчивости элементов дрейфующего ледяного покрова.
2. Подробно проанализирована изменчивость атмосферных процессов, выявлены закономерности, характеризующие связь ледового режима Белого моря с атмосферными процессами.
3. Проведена классификация зим по степени суровости за период с 1885 по 2006 гг., построены карты полей среднемесячного приземного давления для мягкой, умеренной и суровой зим, выявлены связи между макроциркуляционными атмосферными процессами и повторяемостью суровых зим в беломорском регионе.
4. Построены карты вероятности встречи судами льда различной сплоченности и толщины, на основе которых уточнены генеральные маршруты плавания судов во льдах Белого моря.

5 Построены средние многолетние карты ледовой обстановки в Белом море для каждого месяца ледового сезона

6 Разработан метод оперативного численного расчета и прогноза характеристик дрейфующего льда в узлах регулярной сетки для полного ледового цикла (ледообразование в осенне-зимний период, перераспределение льда зимой, разрушение ледового покрова в весенний период)

7 Предложенный метод прошел оперативные испытания на базе Отдела морских гидрологических прогнозов Гидрометцентра России.

8 Выполнены авторские испытания метода расчета и прогноза (на 7 суток) перераспределения льда в Белом море по результатам которых сделаны оценки его обеспеченности и эффективности на основе сравнения результатов счета с данными средних многолетних карт, ледовых авиаразведок и результатов дешифрирования ледовой обстановки по снимкам ИСЗ

9 На основе обработки исходных данных и модельных расчетов получены новые сведения о пространственно-временной изменчивости характеристик ледового режима Белого моря

Положения, выносимые на защиту.

1 Создание комплекта климатических ледовых карт Белого моря на основе статистической обработки натурных данных и модельных расчетов

2 Выявление зависимости между макроциркуляционными процессами, выраженными E, W, C-формами атмосферной циркуляции и ледовитостью Белого моря, а также повторяемостью суровых зим

3 Метод расчета и семисуточного прогноза распределения характеристик дрейфующего льда Белого моря

Методика исследования и использованные материалы В качестве инструмента исследования ледового режима Белого моря использовались

1 Приемы статистического анализа массивов данных, полученных в результате обработки карт ледовых авиационных разведок (рис 1) При работе с картами ледовых разведок использовался метод обработки информации в узлах стандартной сетки с шагом 10 миль, а также снимались данные о протяженности ледовых зон от фиксированных точек береговой черты (рис 2)

2 Метод расчета перераспределения льда в Белом море (реализован на языке ФОРТРАН). Метод базируется на адаптированной к условиям Белого моря двумерной гидродинамической модели Ю П Доронина и использовании эмпирико-статистических зависимостей

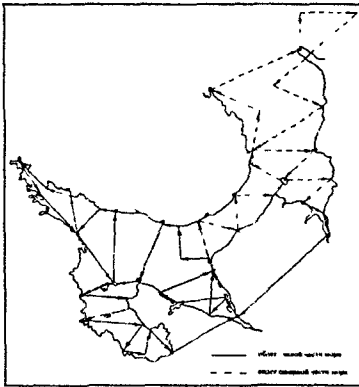


Рис 1 Стандартная схема ледовых разведок

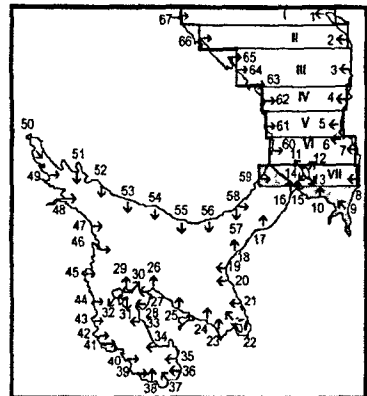


Рис 2 Схема точек и направлений створов при измерении протяженности ледовых зон

Исходными данными для работы послужили материалы архивов Северного УГМС, ГУ «Гидрометцентр России», НИЦ «Планета», ААНИИ

- данные ледовых авиаразведок за 1951-1994 гг ,
- снимки ИСЗ за 1985-2006 гг ,
- гидрометеорологические наблюдения на станциях Белого моря за 1951-2006 гг ,
- данные наблюдений температуры воздуха на ГМС Архангельск за 1885-2006 гг ,
- данные о повторяемости E,W,C-форм атмосферной макроциркуляции за 1900-2002 гг

Практическая значимость. Практическая значимость диссертационной работы обусловлена ее прикладной ориентацией на осуществление гидрометеобеспечения судоходства в Белом море в ледовый период. Результаты комплексного исследования климатической изменчивости характеристик дрейфующего льда Белого моря совместно с результатами модельных расчетов перераспределения дрейфующего льда позволяют более полно оценить роль морского льда в формировании условий мореплавания в период зимней навигации.

Данные модельных расчетов могут использоваться для оценки изменений в распределении льда за период 7 и более суток при длительном закрытии района моря сплошной облачностью.

Локальная численная модель может быть использована в качестве инструмента для исследований при решении климатических задач, а также для расчета и прогноза ледовых характеристик по фактическим и прогностическим метеорологическим данным.

Практическим результатом данной работы является также создание комплекта климатических ледовых карт Белого моря (более 50 карт),

которые могут быть использованы судоводителями для решения разнообразных навигационных задач, в том числе

- планирования морских операций в ледовый период,
- определения сроков начала и конца навигации

Специалисты подразделений Росгидромета могут использовать данные климатические карты при

- прокладке курсов плавания судов во льдах Белого моря,
- проведении исследований, написании справок, экспертиз и т.д.,
- интерпретации ледовых характеристик в процессе дешифрирования снимков ИСЗ

Апробация.

Результаты исследований докладывались и обсуждались

- на научно-практической конференции, посвященной 170-летию Росгидромета (Москва, 2004 г.),
- на общеинститутских семинарах Гидрометцентра России по морским гидрологическим прогнозам (Москва, 2005, 2007 гг.),
- на научно-практической конференции на Форуме «Великие реки» (Нижний Новгород, 2004 г.),
- на научно-практической конференции «Международная морская школа геологин», ИОРАН (Москва, 2005 г.),
- на семинаре «Система Белого моря», ИОРАН (Москва, 2007 г.),
- на общеинститутском семинаре ГОИНа (Москва, 2007 г.),
- на заседании секции Полярных стран Русского географического общества (Москва, 2007 г.)

По теме диссертации опубликовано 7 работ

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 127 наименований и Приложения. Объем диссертации составляет 208 страниц, в том числе 80 таблиц и 104 рисунка. Общий объем приложения – 133 страницы, в том числе 105 рисунков, 36 таблиц. Приложение, в частности, включает

- карты вероятности встречи льда различной сплоченности, толщины и раздробленности,
- карты уточненных курсов ледового плавания в порты Белого моря,
- средние многолетние карты ледовой обстановки в Белом море,
- карты типовой ледовой обстановки в море в зимы разной суровости,
- карты полей давления для зим различной суровости,
- дешифрованные снимки ИСЗ и комментарии к ним, распечатки результатов расчетов и прогнозов.

Автор выражает искреннюю благодарность сотрудникам отдела морских гидрологических прогнозов Гидрометцентра России, Северного УГМС, НИЦ «Планета», ААНИИ за предоставленные архивные данные, а также за существенные советы

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, излагаются ее цели и задачи, научная новизна, практическая ценность, описываются использованные материалы, структура работы

В первой главе изложена обобщенная информация о характеристиках гидрометеорологического и ледового режима Белого моря, полученная на основе анализа большого справочного материала, описано влияние льда на судоходство в этом регионе, проанализированы трудности, возникавшие у судоводителей во время зимних навигаций 2000-2005 гг

Во второй главе представлены результаты исследований межгодовой и внутрисезонной изменчивости положения кромки дрейфующего льда и ледовитости Белого моря, а также дана оценка влияния макроциркуляционных атмосферных процессов на ледовитость и степень суровости зим в Белом море

Результаты обработки массива протяженности ледовых зон представлены в виде карт среднего, максимального и минимального положения кромки дрейфующего льда для декабря-июня, которые демонстрируют большую изменчивость положения кромки

Так, в январе в отдельные годы море может быть полностью покрыто дрейфующим льдом, тогда как в годы минимальной интенсивности развития ледяного покрова дрейфующий лед наблюдается лишь на акватории заливов, что соответствует среднесноголетнему положению кромки льда в декабре и максимальному развитию льда в ноябре. Таким образом, ситуация, когда лед покрывает акватории заливов, а центральная часть Бассейна и Воронки свободны ото льда, может наблюдаться в зависимости от степени активности выхолаживания поверхности моря в период с середины ноября до середины января

В феврале-марте лед в море достигает своего максимального развития В отдельные суровые годы все море покрыто льдом – кромка уходит за пределы Белого моря Межгодовая изменчивость положения кромки льда наименьшая по сравнению с другими месяцами ледового сезона

В конце мая море, как правило, полностью освобождается ото льда Однако в отдельные годы в Бассейне и в Воронке лед может сохраняться до середины июня

На рис 3 – районирование Белого моря

Многолетний ход ледовитости моря, определенной по картам авиаразведок за 1951-1994 гг представлен на рис 4



Рис 3 Районирование Белого моря

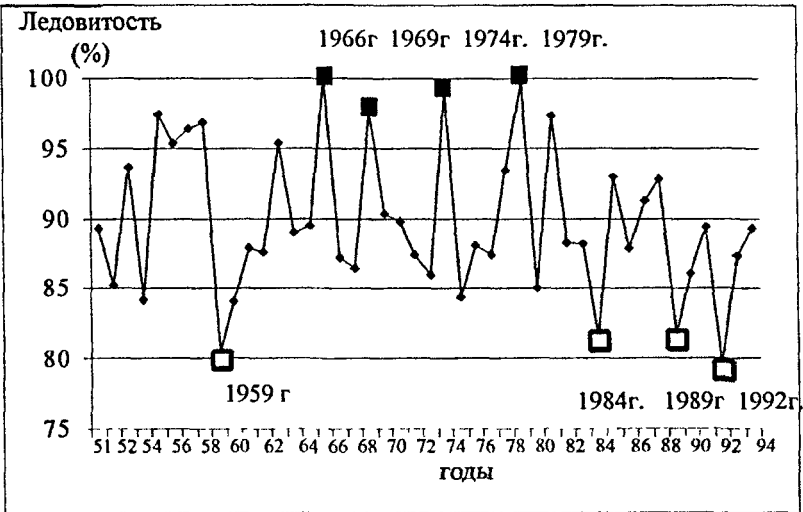


Рис 4 Межгодовая изменчивость ледовитости Белого моря

Для анализа связи параметров ледового режима Белого моря с макроциркуляционными атмосферными процессами, оцениваемыми годовой повторяемостью E, W и C - форм циркуляции по классификации Г Я Вангенгейма и А А Гирса, были определены формы циркуляции, оказывающие наибольшее влияние на ледовые явления.

Было выявлено, что при E-форме циркуляции над Белым морем наблюдается высотный гребень (заток теплого воздуха из умеренных широт), а при C - форме – ложбина (заток холодного арктического воздуха). Главной особенностью зональной (западной) циркуляции (W) являются наблюдающиеся в толще тропосферы волны малой амплитуды, которые смещаются с запада на восток. При W-форме циркуляции частота прохождения циклонов над Белым морем увеличивается втрое по сравнению с меридиональными формами.

В связи с вышеизложенным было сделано предположение о том, что в Белом море для макроциркуляционных C-эпох должна быть характерна высокая повторяемость суровых зим и больших значений ледовитости, а для периодов с большой повторяемостью процессов W-формы циркуляции – мягкие зимы и низкие значения ледовитости.

На рис 5 приведен график межгодовой изменчивости повторяемости W-формы циркуляции в XX веке. В табл I – средние значения ледовитости и повторяемости W-формы циркуляции для выявленных за 44-летний период макроциркуляционных эпох.

Анализ рис 4,5 и табл I позволяет сделать следующие выводы:

- 1 В стадию E-эпохи с 1966-81 гг, когда повторяемость W-формы циркуляции была наименьшей за весь 100-летний период наблюдений, отмечены наибольшие значения ледовитости в момент максимального развития ледяного покрова на этот период приходится 4 ледовых сезона с аномально высокой ледовитостью (1965-66, 1968-69, 1973-74, 1978-79)
- 2 В W-эпоху, наступившую с 1991 г, когда повторяемость W-формы циркуляции резко возросла, отмечены зимы с аномально низкими значениями ледовитости (1983-84, 1988-89, 1991-1992)

Таблица I

Средняя ледовитость Белого моря в период максимального развития ледяного покрова (февраль-март)

Эпоха, стадия эпохи	Период	Средняя повторяемость (число дней) W-формы за год	Средняя ледовитость S (%)
E+C	1951-65гг.	101,7	90,5
E	1966-81 гг	71,0	91,2
E (с W-влиянием)	1982-90 гг	106,8	87,9
W	1991-94 гг	125,5	86,4

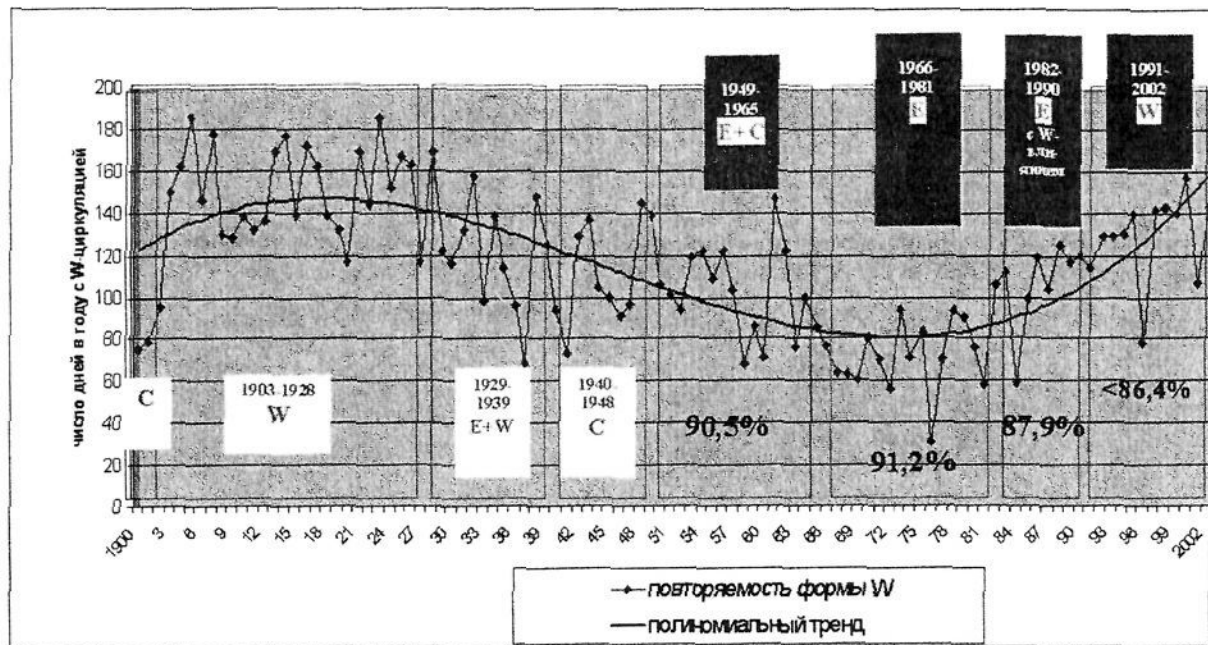


Рис. 5. График межгодовой изменчивости повторяемости W-формы макроциркуляции и средняя ледовитость для эпохи (стадии) в %

Из рис 5 следует, что в настоящее время повторяемость W-процессов очень высока, в силу чего отмечается большая повторяемость мягких зим и легких ледовых условий в Белом море

Для выявления связи между суммами градусо-дней мороза $\sum (-T_a)$, накопленными за ледовый сезон, и макроциркуляционными процессами бала осуществлена классификация зим по степени суровости. При определении критериев использовались данные о суммах градусо-дней мороза для 11 станций Белого моря за 1938-1973 гг. К умеренным зимам были отнесены такие зимы, для которых сумма градусо-дней мороза попадала в интервал «среднее $\pm 20\%$ амплитуды». Критерии суровости зим для Белого моря ($\sum (-T_a)_{\text{море}}$) приведены в табл 2

Таблица 2

Критерии суровости зим

Суровость зимы	$(\sum -T_a)_{\text{море}} (^{\circ}\text{C})$	
	Интервал	Среднее
Мягкая зима	801-1052	926
Умеренная зима	1053-1578	1316
Суровая зима	1579-2114	1846

Была выполнена оценка возможности определения суровости зимы для Белого моря путем использования данных одной станции – ГМС Архангельск, имеющей более чем 120-летний ряд наблюдений. Полученное уравнение регрессии между суммой градусо-дней мороза в Архангельске и суммой градусо-дней мороза в Белом море имеет вид

$$(\sum -T_a)_{\text{море}} = 0,907 (\sum -T_a)_{\text{Арх}}, \quad (1)$$

где $(\sum -T_a)_{\text{море}}$ – сумма градусо-дней мороза для всего моря ($^{\circ}\text{C}$),

$(\sum -T_a)_{\text{Арх}}$ – сумма градусо-дней мороза для ГМС Архангельск ($^{\circ}\text{C}$)

Коэффициент корреляции в данном случае равен 0,97

С помощью уравнения (1) были получены суммы градусо-дней мороза по Белому морю за 120-летний период, что позволило реконструировать картину межгодовой изменчивости суровости зим и определить повторяемость суровых зим на Белом море для различных макроциркуляционных эпох (табл 2)

Анализ табл 3 показывает, что максимальная повторяемость суровых зим зафиксирована на Белом море для меридиональной С-эпохи (1940-48 гг) – 33% и для 80-90-х годов XIX века, также пришедшихся на С-эпоху – 44%

Для W-эпохи (1903-1928 гг) – повторяемость суровых зим оказалась равной 4%

Таблица 3

Повторяемость суровых зим ($P_{\text{сур}}$) на Белом море
для различных макроциркуляционных эпох

Годы (период)	Число лет	Эпоха	Число суровых зим	$P_{\text{сур}}$ (%)
1885-1902	18	С	8	44%
1903-1928	26	W	1	4 %
1929-1939	11	E+W	1	9%
1940-1948	9	С	3	33%
1949-1965	17	E+C	1	6%
1966-1990	25	E	5	20%
1991-2002	12	W	1	8%

В рамках данного исследования была проверена теснота связи между суммами градусо-дней мороза по данным ГМС Архангельск и значениями ледовитости. Выявлено, что для аномальных зим (суровых и мягких) связь достаточно тесная – коэффициент корреляции равен 0,9. Это позволило реконструировать значения максимальной ледовитости моря в мягкие и суровые зимы в конце XIX – первой половине XX века по уравнению регрессии

$$S = 0,01(\Sigma - T_a)_{\text{море}} + 76 ,$$

где S – ледовитость (%), $(\Sigma - T_a)_{\text{море}}$ – сумма градусо-дней мороза ($^{\circ}\text{C}$)

Для 19 суровых зим, пришедшихся на 120-летний период, расчетные значения ледовитости моря в момент максимального развития ледяного покрова составили 91-96%, для 20 мягких зим – 82-85%

Особенности внутрисезонной изменчивости характеристик дрейфующего ледяного покрова можно проследить по построенным 4 видам карт вероятности встречи судами льда различной сплоченности, толщины и раздробленности для шести ледовых месяцев (декабрь-май)

1 карты вероятности встречи льда сплоченностью 7-10 баллов и толщиной более 30 см, показывающие частоту присутствия в различных районах моря самого труднопроходимого для Белого моря льда – тонкого однолетнего (30-70 см), сплоченного и очень сплоченного (7-10 баллов),
2 карты вероятности встречи льда сплоченностью 10 баллов, показывающие частоту присутствия в данном районе моря зон очень сплоченного льда, для которых характерен процесс торошения и возникновение сжатий,

3 карты вероятности встречи больших полей льда,

4 карты вероятности встречи чистой воды, показывающие частоту наличия в данном районе наиболее благоприятного режима мореплавания

Для построения этих карт с бланков ледовых авиаразведок, максимально приближенных по датам к середине соответствующего

месяца, снималась информация о ледовых характеристиках в квадратах сетки с шагом 10 миль. Вероятность встречи льдов (B_k) рассчитывалась по формуле:

$$B_k = \frac{N_k}{n_k} \cdot 100\% , \quad (2)$$

где N_k – число встреч со льдом с заданными свойствами,
 n_k – количество наблюдений в k -м квадрате.

В данной главе приведено описание ледовых условий для различных месяцев ледового сезона, сделанное на основе анализа комплекта карт. Так, для ледовых плаваний в феврале важно учитывать, тот факт, что 9-10 балльный лед с вероятностью более 75 % наблюдается в северо-восточной части Онежского залива, в центральной и восточной частях Бассейна моря, в Горле а также на северо-востоке Мезенского залива и Воронки моря (рис.6). Такое распределение льда поддерживают преобладающие в зимний период над Белым морем южные и юго-восточные ветры. Именно в феврале происходит основной прирост мощности льда. В это время почти вся акватория моря занята дрейфующим льдом.

Из анализа карты вероятности встречи льда сплоченностью 7-10 баллов и толщиной более 30 см следует, что с большой вероятностью (50-75%) тяжелый лед может наблюдаться на северо-востоке Мезенского залива, с вероятностью 25-50% – в Онежском и Кандалакшском заливах, на севере Бассейна и Горла, в восточных частях Мезенского залива и Воронки моря (рис.7).

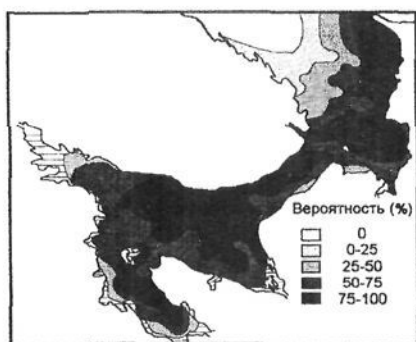


Рис.6. Вероятность встречи льда сплоченностью 9-10 баллов в феврале

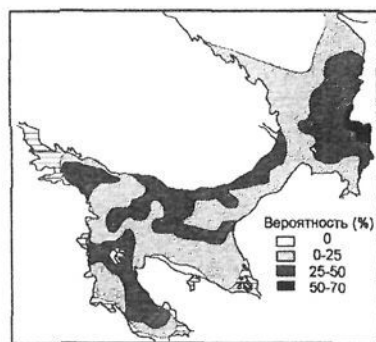


Рис.7. Вероятность встречи льда сплоченностью 7-10 баллов и толщиной более 30 см в феврале

Зоны, соответствующие наименьшей вероятности (0-20%) встречи больших полей – это Онежский залив, северная часть Горла, южная часть Воронки и восток Мезенского залива (рис.8). Практически эти зоны

совпадают с районами максимальной приливной активности моря. Действительно: наибольшие величины прилива наблюдаются в Мезенском заливе, в Горле он уменьшается, в Бассейне — минимален, а в Онежском заливе приливные колебания уровня вновь возрастают. Для перечисленных зон характерны процессы наслоения и торошения льда, а также сжатий, что приводит к затруднению прохождения этих районов судами во время ледовых плаваний. Вероятность существования в феврале зон чистой воды минимальна (рис.9). Образующиеся заприпайные полыньи и разводья быстро покрываются молодым льдом.

На примере двух зимних месяцев, являющихся для Белого моря наиболее сложными для ледовых плаваний (февраль и март), продемонстрирован принцип прокладки оптимальных курсов с использованием карт вероятности встречи льда различного возраста, сплоченности, степени раздробленности, который заключается в следующем: вероятностные карты последовательно совмещаются между собой и анализируются на предмет наиболее благоприятных условий плавания в различных районах Белого моря. При этом ограничивающим фактором для движения виртуального судна является лимит глубины, и, при прочих равных условиях, предпочтение отдается кратчайшему маршруту.

Полный комплект вероятностных карт и схем уточненных маршрутов для всех месяцев ледового сезона приведен в Приложении.

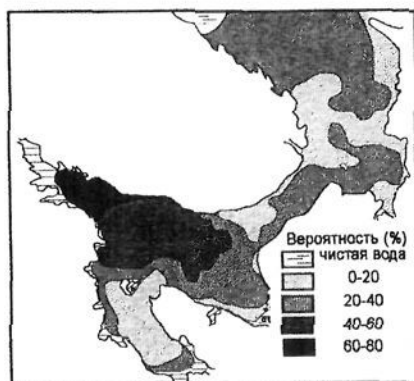


Рис.8. Вероятность встречи обширных и больших полей в феврале

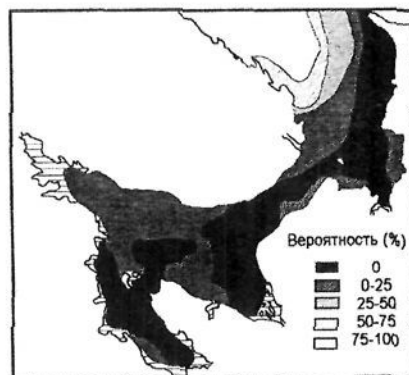


Рис.9. Вероятность встречи чистой воды в феврале

Результаты работы показали, что традиционные рекомендованные курсы не отличаются кардинально от маршрутов, проложенных с помощью карт вероятности встречи льда с различными ледовыми характеристиками. Первые были получены на основе качественного

анализа (практического опыта), а вторые – на основе количественного анализа (вероятностных характеристик) Вероятностные курсы, таким образом, позволяют предложить рекомендации по корректировке традиционных маршрутов

Например, для февраля могут быть предложены следующие рекомендации в Горле моря не приближаться к Терскому берегу, в Двинском заливе двигаться ближе к Зимнему берегу, в Бассейне при плавании в Онежский залив держаться мористее традиционного маршрута, направляясь из Бассейна в порты Онега и Беломорск, использовать Западную Соловецкую салму (рис 10).

Кроме прокладки рекомендованных маршрутов, на основе анализа вероятностных карт были построены средние многолетние карты распределения льда в Белом море За среднее положение границы той или иной зоны принималось положение изолинии 50%-ной вероятности встречи льда с соответствующими характеристиками (рис 11)

Построение и оцифровка среднемноголетних карт были выполнены для всех месяцев ледового сезона Полученные климатические данные были использованы далее в работе для оценки результатов расчетов по численной модели перераспределения сплоченности льда в Белом море путем сопоставления обеспеченности расчетного метода и оправдываемости климатического прогноза.

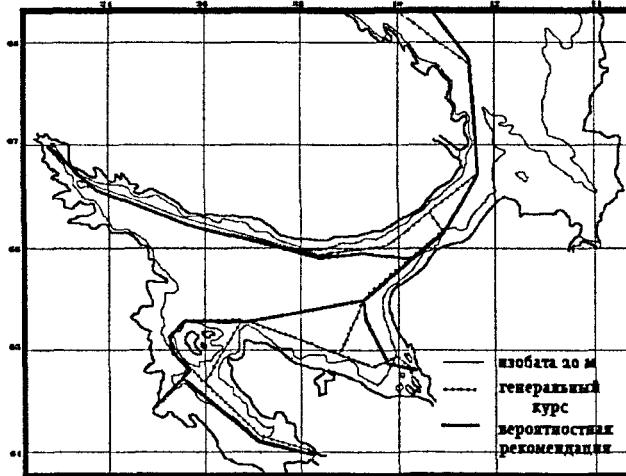
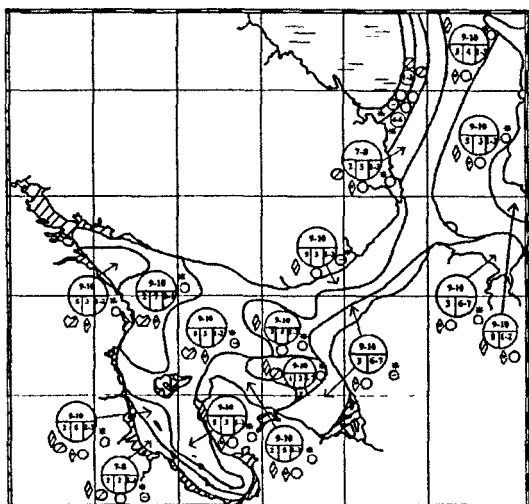
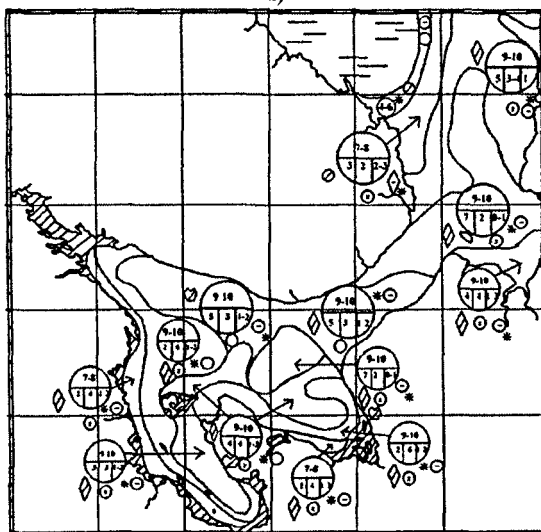


Рис 10 Традиционные генеральные курсы и вероятностные рекомендации для мореплавания в феврале



а)



б)

Рис 11 Средние многолетние карты ледовой обстановки в Белом море для февраля (а) и марта (б)

Обозначения ледовых характеристик соответствуют «Номенклатуре морских льдов»

В третьей главе дан обзор существующих методов физико-статистического и гидродинамического моделирования перераспределения характеристик дрейфующего льда, а также обоснована возможность совместного использования этих подходов для расчета перераспределения сплоченности и толщины льда в Белом море. Схема расчета ледовой обстановки и оценки эффективности метода включает 6 основных блоков, обеспечивающих последовательное выполнение процедур (рис 12).

В блоке подготовки информации осуществляется

- усвоение исходных данных,
- расчет средней температуры воздуха и эффективного излучения,
- формирование массивов сплоченности и средневзвешенной толщины льда по данным ледовых авиаразведок на начало и конец расчета

При этом средневзвешенная толщина льда (H_{cp}) определяется по формуле (3)

$$H_{cp} = \frac{\sum_k H_k S_k}{\sum_k S_k}, \quad (3)$$

где H_k и S_k – частные значения толщины и сплоченности льда различного возраста (ниласа, серого, серо-белого, тонкого однолетнего)

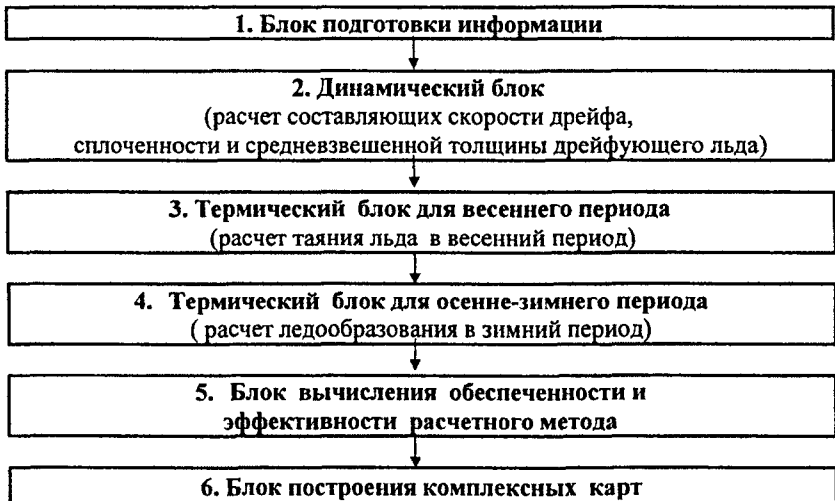


Рис 12. Принципиальная схема программы

В динамическом блоке рассчитываются составляющие скоростей ветрового дрейфа, перераспределение сплоченности и средней взвешенной толщины дрейфующего льда под действием ветра численным способом с шагом по времени 1 сутки с использованием модели Ю П Доронина (Гудкович З М, Доронин Ю П «Дрейф морских льдов», 2001 г)

Решение системы уравнений движения дрейфующего льда реализуется при следующих параметрах.

широта $\varphi = 65^\circ$, плотность льда $\rho_{\text{л}} = 0,9 \text{ г/см}^3$, плотность воздуха $\rho_{\text{а}} = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$; плотность воды $\rho_{\text{в}} = 1,0 \text{ г/см}^3$ постоянный эффективный коэффициент $K_c = 6,5 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$, коэффициенты молекулярной вязкости в воздухе и воде $K_{\text{за}} = 1,32 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ и $K_{\text{зв}} = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, коэффициент турбулентного обмена в воде $K_{\text{тв}} \approx 0,02 \text{ м}^2/\text{с}$, толщины приземного слоя воздуха и слоя трения в воде $h_a = 50 \text{ м}$ и $h_w = 0,5 \text{ м}$, параметр шероховатости верхней поверхности льдины $z_0 = 0,0005 \text{ м}$, параметр Кориолиса $\ell = 0,00013$

Составляющие скорости геострофического ветра при решении системы находятся из формул

$$U_{ax} = -\frac{1}{\rho_a \ell} \sqrt{\frac{\partial P}{\partial y}}, \quad U_{ay} = \frac{1}{\rho_a \ell} \sqrt{\frac{\partial P}{\partial x}}, \quad (4)$$

где U_{ax} и U_{ay} – составляющие скорости геострофического ветра

Коэффициент турбулентности на верхней границе приземного слоя $K_{\text{за}}$ определяется из формулы

$$K_{\text{за}} = \frac{\kappa^2 W_a}{\ln \frac{h_a + z_0}{z_0}} h_a \quad (5)$$

где z_0 – параметр шероховатости верхней поверхностей льдины,

κ – постоянная Кармана, равная 0,4,

$W_a = 0,8 U_a$ – скорость ветра на уровне h_a

Система уравнений движения определяет изменение скорости дрейфа и сплоченности льда в пространстве и содержит 3 переменных – составляющие скорости дрейфа v, u , и сплоченность N . Для замыкания системы используется уравнение неразрывности сплоченности

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\text{div} N \bar{V} = -\left[u \frac{\partial N}{\partial x} + v \frac{\partial N}{\partial y} + N \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] \quad (6)$$

Сначала вычисляются составляющие скорости дрейфа v, u с учетом начального поля сплоченности. Расчет конечных полей сплоченности и средневзвешенной толщины льда сводится к решению уравнения неразрывности. Его конечно-разностный аналог создан для шага сетки $\Delta x = 10$ миль и шага по времени $\Delta t = 1$ сутки

Граничные условия для Белого моря задаются следующим образом

1 Береговая черта определяется по соответствующему присвоенному индексу для береговых точек и припая

2 Перед расчетом скоростей дрейфа, исходя из представления о дрейфе льда по изобарам, задаются следующие условия на берегу если составляющая градиента давления на ось X (параллель) или на ось Y (меридиан) соответствует отжимному для данной точки дрейфу, то на берегу принимается значение сплоченности, равное 0, если нажимному – 1

3 На береговой черте принимаются значения скорости равные половине значений в соседнем узле открытой части моря

4 В узлах регулярной сетки, соответствующих положению Соловецких островов и о Моржевец, скорости дрейфа принимаются равными 0

Кроме того, для сплоченности льда предполагается, что превышение расчетной сплоченности над единицей допустимо до значений 1,03-1,08 (т.е. 3-8% – возможные потери на процесс торошения и прессовки льда) При достижении этого значения в динамическом блоке осуществляется уменьшение скорости дрейфа ($u(i,j)=0,9 u(i,j)$, $v(i,j)=0,9 v(i,j)$) и повторный расчет в цикле до приведения скорости и сплоченности в допустимое соответствие. Это условие является ограничивающим при нажимном дрейфе у берега, а также может выполнять роль идентификатора зон сжатий внутри массива

В термическом блоке для весеннего периода расчет таяния льда осуществляется на основе предложенных Ю.П. Дорониным формул, получаемых из уравнения теплового баланса для дрейфующего льда. Для определения стаивания дрейфующего льда с верхней поверхности за время Δt равное 1 суткам используется уравнение

$$\square H = 0,0139R + 0,12(1 + 0,81r)(0,4 + 0,48U_a)T_a - 1,13(1-r)(0,4 + 0,48U_a) \quad (7)$$

где R – радиационный баланс (в кал/см²сут), r – относительная влажность воздуха (в долях единицы), T_a – температура воздуха (в °C), U_a – скорость геострофического ветра

В весенне-летний период кроме стаивания льда с верхней поверхности, происходит уменьшение сплоченности льда вследствие бокового таяния за счет части потока тепла P , поглощаемого разводьями

$$N = 1 - (1 - N_0) \exp\left(\frac{\rho_w}{L \rho_i} \frac{P}{H} \Delta t\right) \quad (8)$$

Вычисление P – потока тепла из атмосферы – производится по уравнению

$$P = 0,9(Q+q) + 0,51(r-1) \exp(0,083T) + 57,6(0,03T_a - 1), \quad (9)$$

где P – поток тепла из атмосферы (в кал/см²сут), $Q+q$ – сумма прямой и рассеянной радиации (в кал/см²сут), r – относительная влажность

воздуха (в долях единицы), T_a – температура воздуха (в °С)

Ежесуточные значения радиационного баланса определяются по формуле

$$R = (Q + q)(1 - \alpha_m) - I, \quad (10)$$

где α_m – альbedo поверхности моря, I – эффективное излучение

При этом используются климатические значения суммарной радиации (для $\varphi=65^\circ\text{с ш}$) при безоблачном небе $(Q+q)_0$. Для определения $(Q+q)$ в модели используется формула Савинова-Онгстрема

$$Q + q = (Q + q)_0 [1 - (1 - k)n], \quad (11)$$

где k – среднеширотный коэффициент (для $\varphi=65^\circ-67^\circ\text{с ш}$ $k=0,5$), n – облачность в долях единицы (для Белого – 0,8). Эффективное излучение вычисляется по формуле МЕ Берлянда. Альbedo в формуле (10) определяются для каждого узла сетки в зависимости от сезона и сплоченности льда

В термическом блоке для осенне-зимнего периода, т.е. периода нарастания льда модель обеспечивает расчет нарастания толщины льда в каждом узле регулярной сетки по формуле Н.Н. Зубова:

$$H = -25 + \sqrt{(25 + H_0)^2 + 8 * \sum (-T)_a}, \quad (12)$$

где H – конечная толщина льда (см), H_0 – начальная толщина льда (см), $\sum (-T)_a$ – сумма градусо-дней мороза за расчетный период

Коррекция средневзвешенной толщины и сплоченности льда в каждом узле сетки производится в зависимости от накопления суммы среднесуточных отрицательных температур за период $\sum t$. При условии, что $\sum t \leq 10$ суток, в конце цикла происходит увеличение средневзвешенной толщины льда в узлах сетки и увеличение сплоченности льда за счет новообразовавшегося льда. Если период расчета превышает 10 суток, операция увеличения толщины льда и сплоченности в узлах повторяется по прошествии каждых 10 дней.

Увеличение сплоченности в каждом узле сетки определяется по специальной таблице, составленной на основе анализа изменчивости параметров дрейфующего льда и зависит от типа зоны чистой воды, интенсивности ледообразования, принадлежности к тому или иному району Белого моря и периоду ледового сезона, а также величины среднего радиационного баланса R за расчетный цикл.

В блоке вычисления обеспеченности и эффективности осуществляется расчет оправдываемости климатического и инерционного

прогноза в каждом узле сетки, а также эффективности метода по принципу, используемому в оперативной практике ААНИИ, который состоит в следующем

- В качестве критерия оправдываемости (обеспеченности) прогноза (расчета) принимается точность попадания расчетных данных в стандартные интервалы фактической сплоченности (1-3, 4-6, 7-8 и 9-10 баллов)

- Для оценки обеспеченности (оправдываемости) метода расчета сплоченности принимаются следующие условия если фактическая и рассчитанная сплоченности в узле сетки попадают в одну градацию, то прогноз (расчет) считается оправдавшимся (обеспеченным) на 100%, если указанные величины принадлежат соседним градациям, то прогноз (расчет) считается оправдавшимся (обеспеченным) на 50%; в остальных случаях – оправдываемость прогноза (обеспеченность расчета) равна 0

- Обеспеченность расчета поля сплоченности льда определяется как среднее арифметическое обеспеченностей по узлам сеточной области

При вычислении оправдываемости (обеспеченности) прогноза (расчета) средневзвешенной толщины льда за допустимое отклонение принимается значение, равное 20% амплитуды толщины

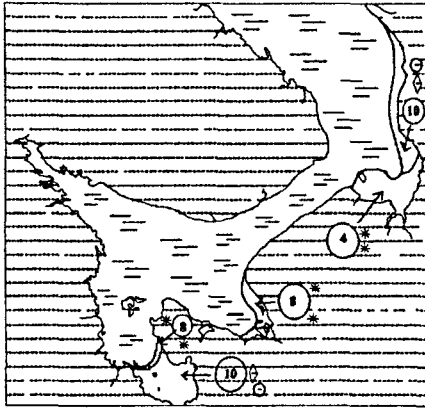
Для определения климатической обеспеченности использовались средние многолетние карты ледовой обстановки, построенные на основе статистической обработки данных ледовых авиаразведок

Для тестирования программы был выбран ледовый сезон 1970-1971 гг. Причиной выбора этого периода, послужил тот факт, что в этот сезон частота осуществленных авиаразведок была очень большой – 24 разведки (по 12 разведок соответственно для северного и южного районов моря) Кроме того, в целях тестирования программы, были просчитаны 6 вариантов по данным ледовых авиаразведок, осуществленных в весенние периоды 1963 и 1965 гг, а также 9 вариантов за январь-апрель 2006 г

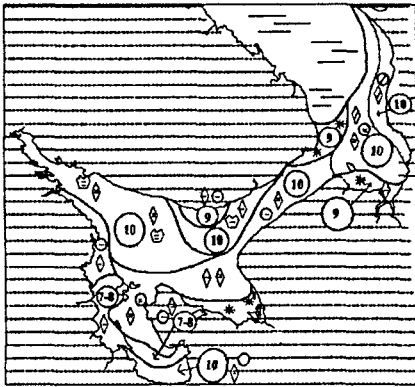
На рис 13 приведен пример расчета ледовой ситуации на период 43-45 дней

Начальная ледовая обстановка (рис 13 а) соответствует данным ледовых разведок, выполненных 6-7 декабря 1970 г, даты окончания расчета соответствуют данным ледовых авиаразведок, выполненных 19-20 января 1971 г. Модель начала работать с момента, когда море было практически свободно ото льда. Конец расчета пришелся на конец второй декады января, когда дрейфующим льдом было покрыто почти все море

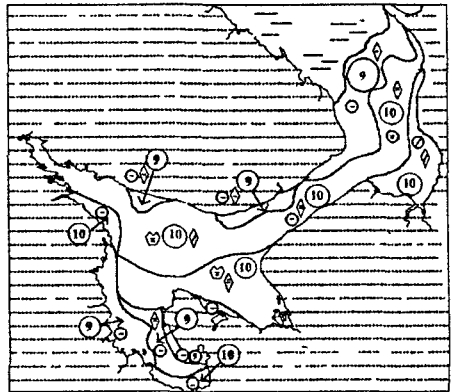
На рис 13 б, в – представлены схемы фактической и рассчитанной ледовой обстановки на 20 января 1971 г. Обеспеченность расчетного метода для сплоченности льда в этом случае оказалась равной 91 % при природной обеспеченности – 77%. Эффективность метода, таким образом, составила 14%. Показатели расчетной и природной обеспеченности для средневзвешенной толщины льда на конец расчета составили 91%



а)



б)



в)

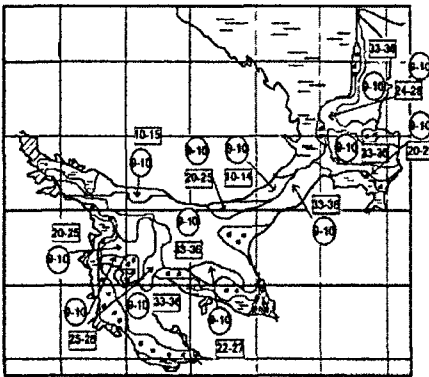
Рис 13 Пример расчета распределения дрейфующего льда в море
(6 12 1970 г – 20 01 2971 г)

- а) – начальная ледовая ситуация,
б) – фактическая ледовая обстановка на
конец расчета,
в) – результат расчета

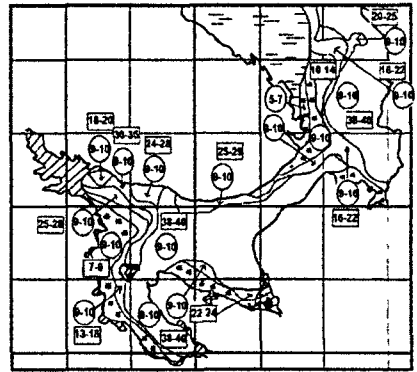
В четвертой главе осуществлен расчет карт типовых барических ситуаций и схем ледовой обстановки для зим различной суровости с использованием разработанного расчетного метода. Предварительно проанализированы типовые метеорологические условия для мягкой, умеренной и суровой зим.

При расчете среднемесячных карт давления для мягкой, умеренной и суровой зим использовались массивы среднемесячных значений давления на 16 гидрометеорологических станциях Белого моря. Кроме того, в качестве исходной информации вводились среднееголетние значения температуры воздуха для зим различной суровости.

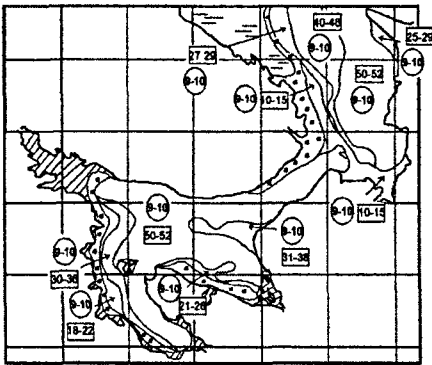
На рис 14 в качестве примера представлены расчетные ледовые карты для марта.



а)



б)



в)

Рис 14 Расчетная ледовая обстановка в марте
 а)- мягкая зима,
 б)- умеренная зима,
 в)-суровая зима

В кружках – сплоченность льда в баллах,
 в прямоугольниках – средневзвешенная толщина льда

Результаты сравнения климатических положений кромки льда и положений кромки, полученных в ходе модельных расчетов продемонстрировали хорошую согласованность. Кроме того, результаты расчета были сопоставлены с фактическими ледовыми условиями для соответствующих годов-гомологов. Выбор годов-гомологов производился путем выявления наибольшего соответствия средних месячных значений давления (p) и сумм градусо-дней мороза (ΣT_a) типовым критериям для мягкой, умеренной и суровой зим. Для мягкой зимы в наибольшей степени соответствующим типовым критериям оказался ледовый сезон 1974-75 гг, для умеренной зимы – 1981-82 гг, для суровой зимы – 1968-69 гг.

В пятой главе проанализированы результаты авторских испытания расчетного метода на прогностических исходных данных. Осуществлены расчет и прогноз ледовой обстановки в Белом море с 7-суточной заблаговременностью в период с января по апрель 2006 г. В табл. 4 приведены результаты оценки расчета сплоченности (S) и толщины льда (H) для ледового сезона 2006 г по фактическим метеорологическим параметрам. Данные об эффективности прогноза на 7 суток по данным метеорологических прогнозов модели атмосферы Европейского центра среднесуточных прогнозов погоды (ЕЦСПП) приведены в табл. 5.

Эффективность расчета (E) определялась как разность между средней по всем узлам сетки обеспеченностью расчета (R) и средними по всем узлам значениями оправдываемости инерционного прогноза (I) или климатического прогноза (K).

При этом под «инерционным прогнозом» понималось сохранение неизменным наблюдаемое в момент начала расчета состояние дрейфующего ледяного покрова. Под «климатическим прогнозом» понималось принятие в качестве информации о предполагаемой ледовой обстановке данных, соответствующих картам среднемесячной ледовой обстановки в Белом море (рис. 11).

Таблица 4

Обеспеченность и эффективность (%) метода расчета сплоченности (S) и толщины льда (H) по фактическим метеорологическим параметрам

№	Период расчета	R		I		K		E=R-I		E=R-K	
		S	H	S	H	S	H	S	H	S	H
1	10 01-17 01	81	86	66	74	58	70	15	12	23	16
2	17 01-24 01	74	87	54	72	72	93	20	15	2	-6
3	24 01-31 01	89	94	80	88	74	84	9	6	15	10
4	14 02-21 02	94	61	94	61	88	62	0	0	6	-1
5	21 02-28 02	91	66	91	57	83	51	0	9	8	15
6	28 02-07 03	96	71	92	71	85	54	4	0	11	17
7	07 03-14 03	94	77	93	74	87	62	1	3	7	15
8	11 04-18 04	61	-	61	-	61	-	0	-	0	-
9	18 04-25 04	62	-	59	-	56	-	3	-	6	-
Средняя		82	78	77	71	74	68	6	7	9	10

Таблица 5

Оправдываемость и эффективность (%) метода расчета сплоченности (S) и толщины льда (H) по прогностическим метеорологическим параметрам

№	Период расчета	R		I		K		E =R-I		E=R-K	
		S	H	S	H	S	H	S	H	S	H
1.	10 01-17 01	78	85	66	74	58	70	12	11	20	15
2	17 01-24 01	77	97	54	72	72	93	23	25	5	4
3	24 01-31 01	89	86	80	88	74	84	9	-2	15	2
4	14 02-21 02	94	61	94	61	88	62	0	0	6	-1
5	21.02-28 02	90	68	91	57	83	51	-1	11	7	17
6	28 02-07 03	96	71	92	71	85	54	4	0	11	17
7	07 03-14 03	94	77	93	74	87	62	1	3	7	15
8	11 04-18 04	61	-	61	-	61	-	0	-	0	-
9	18 04-25 04	59	-	59	-	56	-	0	-	3	-
Средняя		81	78	76	71	73	68	5	7	8	10

Средняя оправдываемость прогноза для сплоченности и толщины льда составила соответственно 81 и 78% Средняя эффективность прогнозов по сравнению с обеспеченностью инерционного прогноза для сплоченности и толщины льда составляет 5% и 7% соответственно, по сравнению обеспеченностью климатического прогноза – 8% и 10% соответственно

В заключении работы приведены основные результаты диссертации

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1 Проанализирована внутрисезонная и межгодовая изменчивость положения кромок дрейфующего льда и максимальной ледовитости Белого моря. Анализ связей ледовитости Белого моря с макроциркуляционными (E, W, C) атмосферными процессами выявил существование зависимости между повторяемостью W-формы циркуляции и значениями ледовитости в момент максимального развития ледяного покрова

2 Определены критерии интервалов для мягкой, умеренной и суровой зим по станциям и по всему Белому морю

3 По 120-летнему ряду наблюдений на ГМС Архангельск выполнена реконструкция на конец XIX – первую половину XX вв .

- межгодовой изменчивости суровости зим, позволившей определить повторяемость суровых зим на Белом море для различных макроциркуляционных эпох,

- ледовитости моря в годы с аномальными (мягкими и суровыми) ледовыми условиями

При этом установлено, что

- максимальная повторяемость суровых зим на Белом море характерна для меридиональной С-эпохи (1940-48 гг) – 33% и для 80-90-х годов XIX века, также пришедшихся на С-эпоху – 47%,
- для переходных эпох (С+W, E+C, E+W), а также для W-эпохи (1913-1928 гг) – повторяемость суровых зим низкая, порядка 4-9%

4 Создан ледовый атлас Белого моря, включающий в себя более 50 карт

- карты вероятности встречи льда сплоченностью 7-10 баллов и толщиной более 30 см,
- карты вероятности встречи льда сплоченностью 10 баллов,
- карты вероятности встречи больших и обширных полей льда,
- карты вероятности встречи чистой воды,
- ежемесячные средние многолетние карты ледовой обстановки,
- ежемесячные карты типовой ледовой обстановки для зим различной суровости

Карты ледового атласа имеют самостоятельную ценность для специализированного гидрометобеспечения морских операций в Белом море в ледовый период

5 Уточнены традиционные маршруты плавания судов в порты Белого моря в период зимней навигации

6 Построены ежемесячные среднемноголетние карты ледовой обстановки

7 Разработан метод расчета и прогноза перераспределения сплоченности и толщины дрейфующего льда в Белом море

8 Выполнены его испытания на фактическом и прогностическом материале Средняя обеспеченность метода за период с декабря по май 1970-1971 гг (24 эпизода) составила 81% для сплоченности и 70% для толщины льда Эффективность расчетного метода для сплоченности по сравнению с инерционной обеспеченностью – 10%, по сравнению с природной обеспеченностью – 6% Эффективность метода для толщины льда по сравнению с инерционной обеспеченностью – 3 %, по сравнению с природной обеспеченностью – 5% Обеспеченность метода для сплоченности по данным весенних периодов 1963 и 1965 гг составила 77% при инерционной обеспеченности 62% Эффективность метода по данным весенних периодов составила 15%

Результаты тестирования расчетного метода, таким образом, показали, что он достаточно хорошо воспроизводит эволюцию ледяного покрова, что дает основание рекомендовать его для решения прогностических и климатических задач в оперативно-производственной практике

9 Осуществлен расчет карт ледовой обстановки по климатическим массивам метеорологических элементов для мягкой, умеренной и суровой

зим Определены качественная и количественная оценка надежности расчетного метода при решении климатических задач Средняя по морю обеспеченность расчета (по сравнению с годами-гомологами) для сплоченности льда составила в январе, марте и мае – 93 %, 90 % и 81 % (соответственно), для толщины льда в январе и марте – 74% и 77% (соответственно) Такой расчет может рассматриваться в качестве основы для прогностического метода при условии предсказания суровости зимы

10 Проведено испытание метода в качестве прогностического Результаты верификации метода расчета и семисуточного прогноза перераспределения характеристик дрейфующего льда Белого моря показали его надежность для решения прогностических и климатических задач

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

- 1 Думанская И О Анализ изменчивости положения кромок дрейфующего льда и максимальной ледовитости Белого моря// Труды Гидрометцентра России, 2004, вып 339. – с 45-54
- 2 Думанская И О Динамико-статистическая модель перераспределения льда в Белом море// Метеорология и гидрология, 2007, № 4 – с 69-79
- 3 Думанская И О Зависимость ледовитости Белого моря от макроциркуляционных атмосферных процессов// Труды Гидрометцентра России, 2004, вып 339 – с 55-63
4. Думанская И О Использование вероятностных площадных характеристик дрейфующего льда для построения локальной численной модели перераспределения льда в Белом море// Метеоспектр, 2005, № 4 – с 53-63
- 5 Думанская И О Использование вероятностных площадных характеристик дрейфующего льда для гидрометеорологического обеспечения морских транспортных операций и построения численной модели перераспределения льда в Белом море// Труды Гидрометцентра России, 2006, вып 341 – с 42-78
- 6 Думанская И О. Использование режимных ледовых характеристик для гидрометеорологического обеспечения транспортных операций и построения численной модели распределения льда в Белом море// Тезисы докладов XVI Международной школы морской геологии Геология морей и океанов, т 1, М, 2005 – с 63-65
7. Думанская И О Методы изучения площадных характеристик дрейфующего льда и их прикладное значение для гидрометобеспечения транспортных операций в Белом море// Метеоспектр, 2004, №1(17) – с 61-72

Отпечатано в ООО «Компания Спутник+»
ПД № 1-00007 от 25 09 2000 г.
Подписано в печать 27 04 07
Тираж 100 экз. Усл. п.л. 1,88
Печать авторефератов (495) 730-47-74, 778-45-60