

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ ПО РАЗВИТИЮ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ МЕТОДОВ ДОЛГОСРОЧНЫХ ПРОГНОЗОВ ЛЕДОВЫХ И ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В АРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ

В статье рассмотрены основные результаты выполнения плановых научно-технологических работ Росгидромета по проекту «Развитие существующих и разработка новых методов и технологий долгосрочного (месячного и сезонного) прогнозирования элементов ледово-гидрологического режима арктических морей, низовьев и устьевых областей рек в условиях климатических изменений» за период 2020–2024 годов. Проект включал в себя результаты семи научно-исследовательских тем, связанных с разработкой методов долгосрочных и сверхдолгосрочных прогнозов различных элементов ледового, гидрологического и навигационного режимов российских арктических морей. В исследованиях принимали участие сотрудники четырех ведущих подразделений ФГБУ «АНИИ»: ледового режима и прогнозов (ОЛРиП), океанологии (ООк), взаимодействия океана и атмосферы (ОВОиА), гидрологии устьев рек и водных ресурсов (ОГУРиВР).

Первая группа тем содержит исследования по разработке методов долгосрочных ледовых прогнозов с заблаговременностью 1–2 месяца:

- метод прогноза распределения возрастного состава льда в зимний период;
- метод прогноза сроков устойчивого ледообразования в Карском море с учетом данных о температуре поверхности воды;
- метод прогноза температуры воздуха для восточных арктических морей на холодный период года на основе макроциркуляционного метода;
- методы прогноза максимальных уровней воды рек Пур, Надым, Пяку-Пур и Таз.

Вторая группа тем связана с разработкой сверхдолгосрочных прогнозов, статистических моделей и сценариев долговременных изменений состояния арктической атмосферы, океана и ледяного покрова Арктики:

– разработка методических основ сезонных прогнозов состояния льда в арктических морях и в Арктическом бассейне Северного Ледовитого океана (СЛО);

– разработка концептуальной модели влияния астрогеофизических факторов на состояние атмосферы, океана и ледяного покрова, статистических моделей межгодовых и климатических изменений, а также сценариев долговременных изменений состояния атмосферы, океана и ледяного покрова Арктики.

И, наконец, последнее направление исследований связано с изучением ледового плавания и разработкой методики автоматизированного выбора оптимальных маршрутов безледокольного плавания судов типа Arc7 в акватории Северного морского пути (СМП) в зимний период.

Первая тема была посвящена исследованию возможности долгосрочного прогнозирования распределения возрастного состава льда в зимний период. Исследование выполнялось в лаборатории долгосрочных ледовых прогнозов ОЛРиП под руководством заведующего лабораторией А.В. Юлина

Основной целью исследования была разработка метода долгосрочного прогноза распределения количественного состава льдов различного возраста (толщины) в каждом из 28 районов трасы СМП с заблаговременностью 30 суток и декадной дискретностью (рис. 1).

Выполненные исследования позволили установить основные закономерности формирования возрастного состава льда в арктических морях в зимний период и выявить наиболее информативные показатели гидрометеорологических процессов, формирующих эти изменения и влияющих на них.

Было установлено следующее:

– изменения возрастного состава проявляют хорошо выраженную закономерность и выраженный сезонный ход изменений;

– большая инерционность в процессе накопления льдов одной возрастной градации определяет большую роль начальных условий;

– значимые оценки статистической связи количества льдов разного возраста с основными действующими факторами (приземное давление, разность давления на створах, приземная температура воздуха, сумма градусо-дней мороза, ход предшествующего развития толщины ледяного покрова, тип развития возрастного состава льдов);

– предел физической предсказуемости определяет эффективную заблаговременность прогноза в 30–45 суток.

По результатам выполненного исследования разработана прогностическая программа «Пегас-зима», версия 1.0-2024 и получено «Свидетельство о государственной регистрации программы».

Программа «Пегас-зима» позволяет выделять наиболее информативные створы давления, определяющие формирование зимних ледовых условий, использовать температуру воздуха или сумму градусо-дней мороза в узлах сетки. В качестве важного предиктора используется текущее накопленное количество льдов различного возраста.

На основании построенных прогностических схем была разработана методика долгосрочного прогноза возраста льдов в зимний период для арктических морей заблаговременностью до 1 месяца.

Авторские испытания проводились в отделе ледового режима и прогнозов ААНИИ. Расчеты проводились с осеннего по весенний период 2020–2021, 2021–2022 и 2022–2023 годов. Прогноз составлялся в конце каждого месяца осенне-зимнего сезона на 1–3-ю декады следующего месяца.

При прогнозировании количества льдов различного возраста получены хорошие результаты. В среднем оправдываемость прогнозов составляет:

– для Карского моря — 81 %, эффективность метода 7 %;

– для моря Лаптевых — 84 %, эффективность метода 13 %;

– для Восточно-Сибирского моря — 83 %, эффективность метода 13 %;

– для юго-западной части Чукотского моря 84 %, эффективность метода 12 %.

Наименьшая оправдываемость прогноза приходится на начальные и молодые льды. В среднем она составляет 75–80 %. Оправдываемость прогноза количества однолетних льдов в среднем составляет 81–86 %. Наилучшая оправдываемость приходится на количество старых льдов, для которых она составляет 87–93 %.

Вторая тема была посвящена разработке метода долгосрочного прогноза сроков устойчивого ледообразования в Карском море с учетом данных о температуре поверхности воды. Исследование проводилось группой сотрудников ОЛРиП под руководством ведущего научного сотрудника А.Г. Егорова.

В рамках исследования был подготовлен массив исходных данных по срокам устойчивого ледообразования в Карском море, а также проведена оценка многолетних изменений сроков устойчивого ледообразования за 1981–2022 годы. Было выделено 6 типов ледообразования в юго-западной и северо-восточной частях Карского моря — очень ранний, ранний, средний, поздний, очень поздний, экстремально поздний. Были установлены основные особенности развития процессов ледообразования при реализации каждого из выделенных типов.

На основе выявленных природных связей ледовых и температурных показателей были разработаны физико-статистические модели долгосрочного прогноза сроков ледообразования в Карском море с учетом данных о температуре поверхности воды.

Сущность прогностической методики для северо-восточной части Карского моря заключается в следующем:

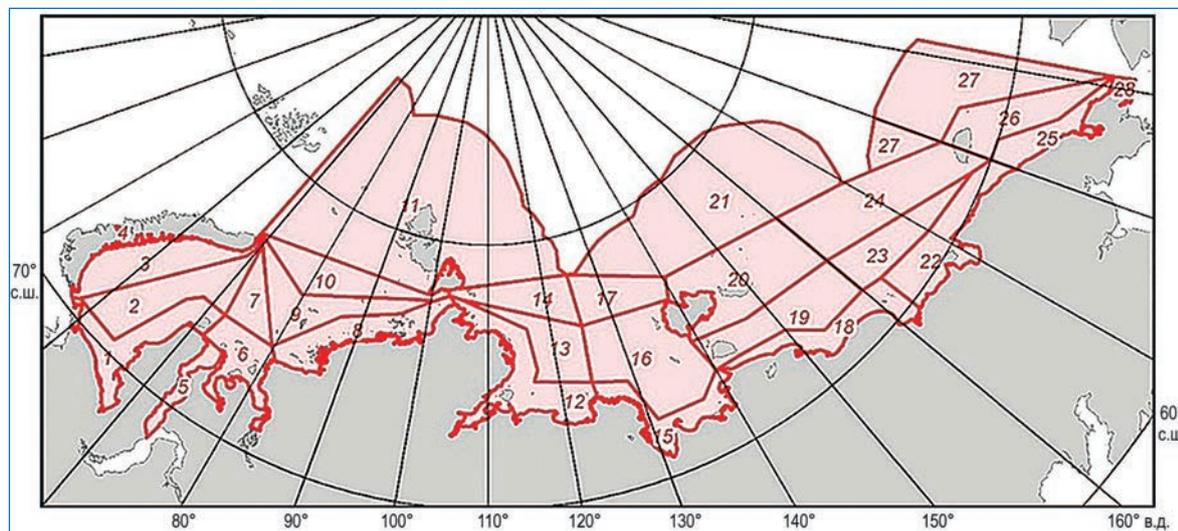
– по ансамблю основных предикторов, определяющих формирование аномалий сроков устойчивого ледообразования и уже известных к моменту составления прогноза, определяется ожидаемое средневзвешенное отклонение от среднемноголетней нормы даты устойчивого ледообразования для всего моря;

– по величине ожидаемого отклонения определяется прогностический тип сроков устойчивого ледообразования;

– каждому типу соответствует средняя типовая карта пространственного распределения сроков устойчивого ледообразования по акватории моря;

– это типовое распределение и является прогностическим полем.

Рис. 1. Схема расположения районов акватории Северного морского пути



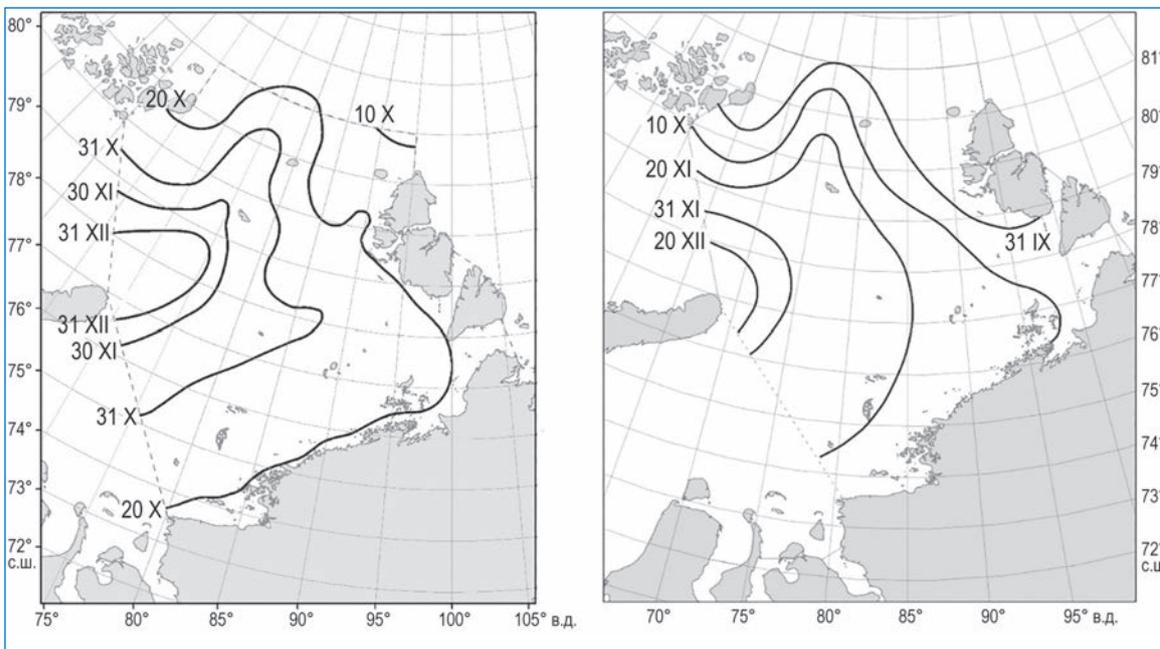


Рис. 2. Прогнозируемое и фактическое развитие сроков устойчивого ледообразования в Карском море с учетом поверхностной температуры воды в осенний период 2023 года

Проведенные авторские испытания метода для юго-западной (71 узел сетки) и северо-восточной (105 узлов сетки) части Карского моря на примере осеннего периода 2023 года показали оправдываемость в 80 %, что при обеспеченности в 57 % дает эффективность, равную 23 % (рис. 2).

Третья разработка была посвящена усовершенствованию методики долгосрочного прогноза температуры воздуха для восточных арктических морей в холодный период года на основе макроциркуляционного метода. Исследования проводились группой специалистов лаборатории долгосрочных метеорологических прогнозов ОЛРиП под руководством зав. лабораторией В.В. Иванова.

На первых этапах исследования были получены многолетние синоптико-климатологические характеристики. Проведенная классификация синоптических процессов позволила выделить три типа формирования различных аномалий температуры в морях: около нормы, выше нормы и ниже нормы. Установлено, что каждый тип имеет принципиально значимые отличия в направленности крупномасштабных атмосферных процессов при различных формах атмосферной циркуляции по классификации Г.Я. Вангенгейма (W-западная, E-восточная и C-меридиональная). Каждая разновидность характеризуется определенной формой макропроцесса с преобладающими траекториями циклонов и вариантами адвекции воздушных масс в западном районе Арктики.

На основе выявленных закономерностей была разработана методика долгосрочного прогноза температуры воздуха для восточных арктических морей в холодный период года.

Основной алгоритм разработки долгосрочного метеорологического прогноза включает в себя (рис. 3):

- анализ и диагноз текущих атмосферных процессов, форм и типов циркуляции;
- экспертную оценку расчленения непрерывных процессов по естественным стадиям различного пространственно-временного масштаба;

- выбор из исторического архива лет-гомологов для прогноза;
- прогноз синоптического положения в виде карт расчетных метеорологических полей;
- расчетные данные метеорологических параметров в текстовом и картированном виде.

Рис. 3. Схема методики долгосрочного прогноза температуры воздуха для восточных арктических морей в холодный период года



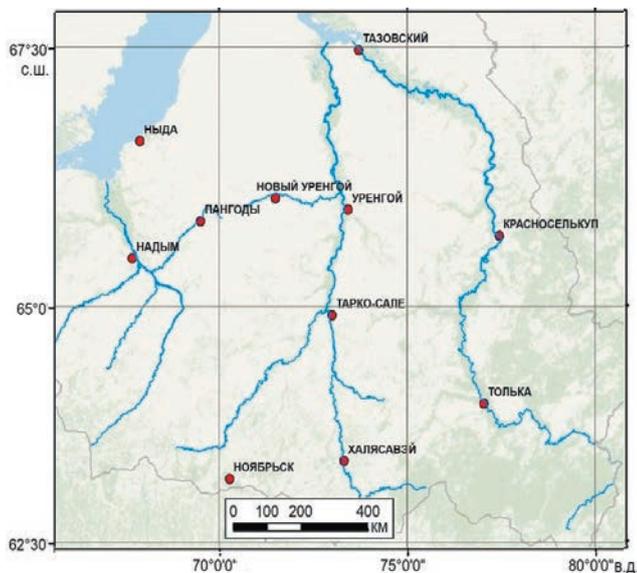


Рис. 4. Схема пунктов наблюдений речной сети Обско-Тазовской устьевой области

Испытания методики проводились в период 2023–2024 годов в соответствии с требованиями Руководства и Наставлений, утвержденных Росгидрометом.

Средняя оправдываемость прогнозов составила от 82 до 91 %. Средняя оправдываемость прогнозов по величине температуры при заблаговременности до одного месяца при допустимой погрешности 0,67 составила 72 %. Эффективность прогнозов по величине аномалий температуры по отношению к климатическим прогнозам с допустимой погрешностью по отдельным месяцам колебалась в пределах от 8 до 17 %.

Четвертая разработка была посвящена созданию методики долгосрочного прогноза максимальных уровней рек Пур, Надым, Пякупур и Таз (рис. 4). Этой разработкой занимались сотрудники ОГУРиВР К.В. Ромашова и Н.А. Волкова под руководством зав. отделом М.В. Третьякова.

В рамках выполнения исследовательского проекта были подготовлены электронные архивы специализированных данных об уровне и ледовом режиме рек и основных метеопараметрах Обско-Тазовской устьевой области. Для решения задачи долгосрочного прогнозирования максимальных уровней воды весеннего половодья рек Пур, Пякупур, Надым и Таз в качестве исходных данных выбирались метеорологические характеристики, оказывающие влияние на формирование волны половодья: температура воздуха, температура поверхности почвы, сумма осадков, снежный покров, относительная влажность, дефицит насыщенного водяного пара, температура точки росы, направление ветра, средняя скорость ветра, а также среднесуточные данные о уровнях воды рек за период с 1 сентября по 28 февраля по речным постам рек Таз, Пур, Пякупур, Надым.

В ходе исследований проведено множество экспериментов с различными архитектурами нейронных сетей для задачи долгосрочного прогнозирования максимального уровня рек. В результате этих исследований было установлено, что архитектура полносвязной нейронной сети показала наилучшие результаты:

1) полносвязный слой (Dense) с 128 нейронами. Используется функция активации ReLU (Rectified Linear Unit) для введения нелинейности в модель, что позволяет ей учиться сложным закономерностям в данных;

2) слой нормализации пакетов (Batch Normalization) нормализует входные данные для каждого мини-пакета, что помогает стабилизировать и ускорить процесс обучения. Этот слой также способствует снижению чувствительности модели к инициализации весов и позволяет использовать более высокие скорости обучения;

3) слой Dropout случайным образом отключает 50 % нейронов на каждом шаге обучения. Это помогает предотвратить переобучение модели, заставляя ее учиться более обобщенным признакам;

4) второй полносвязный слой (Dense) с 64 нейронами. Используется функция активации ReLU также для введения нелинейности;

5) второй слой нормализации пакетов (Batch Normalization) для стабилизации и ускорения обучения;

6) второй слой (Dropout) для предотвращения переобучения;

7) выходной слой (Dense) с одним нейроном, который предсказывает максимальный уровень реки. Используется линейная функция активации, так как задача представляет собой регрессию.

На основе построенной полносвязной нейронной сети была разработана методика долгосрочного прогноза максимальных уровней рек Пур, Надым, Пякупур, Таз. Проведены авторские испытания методик, которые показали хорошие результаты. Погрешность прогноза уровня воды за 2023–2024 годы составила от 3 до 32 см.

В группе тем, связанных с разработкой методов сверхдолгосрочных прогнозов, статистических моделей и сценариев, одной из двух тем была разработка методических основ сезонных прогнозов состояния льда в российских арктических морях Карском и Чукотском заблаговременностью 3–6 месяцев. Исследованиями занимались сотрудники ОВОиА под руководством гл. научного сотрудника Г.В. Алексева.

Анализ показал тесную связь между температурой, содержанием водяного пара, нисходящим длинноволновым излучением и суммой градусо-дней мороза за октябрь–апрель (СГДМ) и ледяным покровом арктических морей, по которым проходит Северный морской путь (СМП). СГДМ были рассчитаны по данным наблюдений на 18 метеостанциях вдоль побережья морей и сопоставлены со среднемесячными значениями ледовитости Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского морей. Установленные зависимости летней ледовитости от зимней суммы градусо-дней мороза выбраны в качестве основы для разработки метода прогноза сплоченности летнего морского льда в морях СМП на сезон.

Близость между ледовитостью и главной компонентой разложения поля сплоченности, заданного в узлах регулярной сетки в реанализе HadISST, на естественные ортогональные составляющие дала возможность прогноза поля сплоченности (главной компоненты поля) с использованием оценок связи СГДМ и ледовитости.

Зависимость ГК1 полей среднемесячной сплоченности от СГДМ за октябрь–апрель реализована в виде уравнений регрессии для каждого моря и месяца с июля по октябрь. Обобщение результатов оценки качества опытных прогнозов коэффициентами корреляции между исходным и прогнозным полями сплоченности показало, что с помощью СГДМ прогнозируется от 85 до 96 % изменчивости главной компоненты поля сплоченности. В соответствии с вкладом главной компоненты в изменчивость поля ее прогноз отражает от 40 до 72 % изменчивости, при этом прогноз отражает основные особенности распределения и дает представление об ожидаемом фоне ледовых условий.

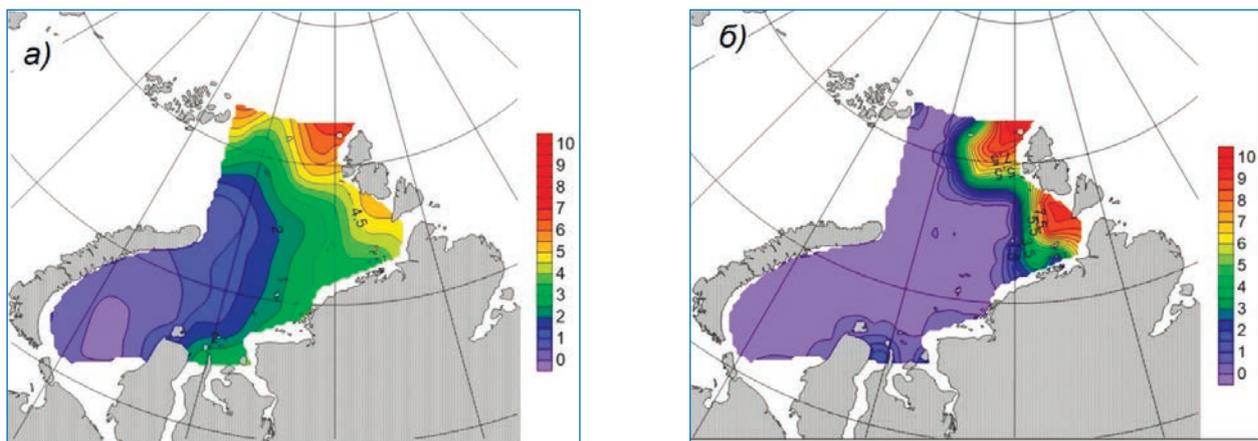


Рис. 5. Пример опытного прогноза среднемесячной сплоченности льда в Карском море в октябре 2021 года с заблаговременностью 6 месяцев (а) и фактическая сплоченность (б)

При доработке авторских версий сезонного прогноза летней сплоченности привлечена дополнительная информация о сумме градусо-дней в открытой части морей. В результате получены модели, обеспечивающие эффективность прогноза по зависимой выборке не менее 24 %. На рис. 5 показан пример опытного прогноза сплоченности льда в Карском море в октябре 2021 года вместе с фактической сплоченностью.

Второй исследовательской темой, посвященной разработке сверхдолгосрочных методов прогнозов, статистических моделей и сценариев, явилась работа по изучению возможности разработки концептуальной модели влияния астрогеофизических факторов на состояние атмосферы, океана и ледяного покрова, статистических моделей межгодовых и климатических изменений, а также построению сценариев долговременных изменений состояния атмосферы, океана и ледяного покрова Арктики. Исследованием занимались сотрудники ООк под руководством гл. научного сотрудника Л.А. Тимохова.

В рамках выполнения исследовательской темы были подготовлены электронные архивы исходных данных, на основе которых проведен анализ сопряженности структуры полей атмосферного давления и ледовитости с солнечными циклами.

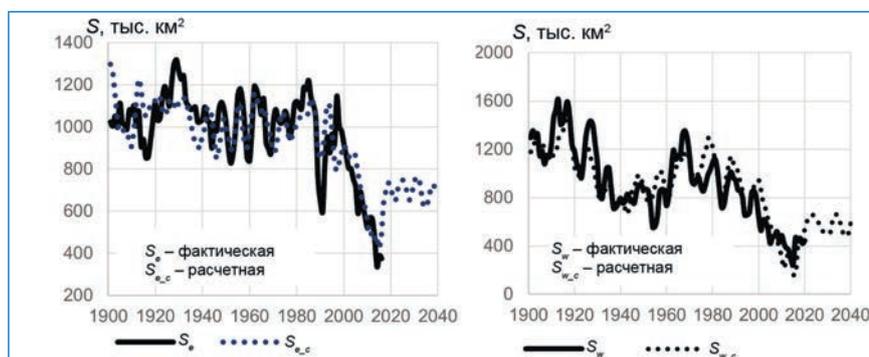
Была исследована статистическая структура и сопряженность долгопериодных изменений характеристик состояния атмосферы, океана и ледяного покрова Арктики с колебаниями астрогеофизических параметров для периода 1900–2021 годов. Разработаны статистические модели второго уровня межгодовых и климатических изменений температуры воздуха, индексов и форм атмосферной циркуляции, климатических индексов ат-

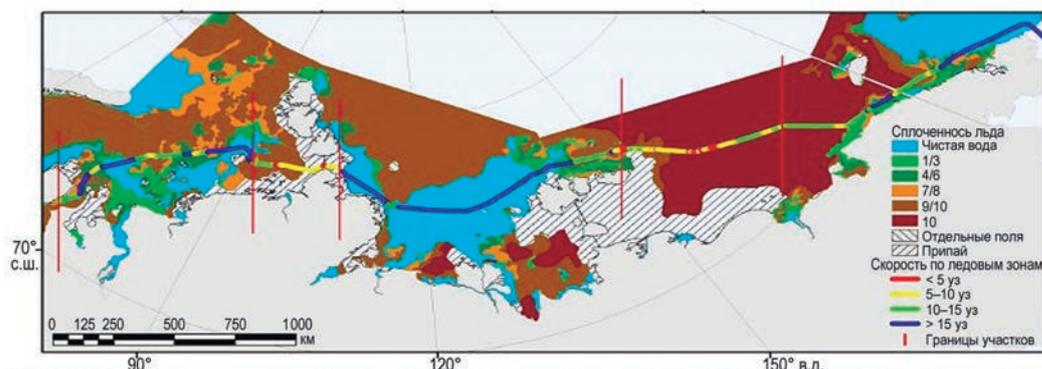
мосферы и океана, ледовитости восточных и западных морей Арктики, высоты уровня на полярных станциях, поверхностной температуры и сезонной ледовитости морей Северо-Европейского бассейна с учетом внешних воздействий. Всего разработано 54 статистических модели для перечисленных предиктантов. Выполнен анализ устойчивости статистических моделей и установлено, что разработанные новые статистические уравнения, по крайней мере на периоде 10 лет вперед, имеют определенную устойчивость.

По астрогеофизическим предикторам выполнены экспериментальные прогнозы на период до 2040 года. По результатам предвычисления средняя трехлетняя температура воздуха в Арктике после 2024 года будет колебаться с периодом около 11 лет с трендом понижения температуры до уровня 2005–2010 годов. Выполненные предвычисления среднего трехлетнего индекса АМО, который отражает тепловое состояние Северной Атлантики, показали, что будет наблюдаться тренд к его небольшому увеличению, а после 2025 года до 2040 года будет наблюдаться его уменьшение до уровня 2005–2010 годов.

Составлен сценарий долговременных изменений на период до 2040 года, согласно которому температура воздуха в арктической зоне 70–85° с. ш. будет понижаться, сохраняя небольшие межгодовые вариации, с минимумом около 2030 года и максимумом около 2036 года. Затем ожидается понижение температуры к 2040 году, а ледовитость арктических морей будет уменьшаться к 2033–2035 годам и увеличиваться к 2040 году. Ожидаемое увеличение ледовитости в 2030–2040 годах, вероятно, не достигнет уровня тяжелой ледовитости 1970-х годов (рис. 6).

Рис. 6. Кривые изменения фактических (S_e , S_w) и расчетных ($S_{e,c}$, $S_{w,c}$) долгопериодных изменений ледовитости западных и восточных морей Арктики





Номер участка	1	2	3	4	5	
Наименование участка	ЮВ Карского моря	Юг Северо-Земельского массива	Новосибирская полярная	Айонский массив	Чукотская полярная	
Характерная сплочённость	4/6	10	1/3	9/10-10	4/6	
Преобладающая форма	Обломки полей, битый	Припай	Битый	Поля, обломки полей	Битый, тёртый	
Загрязнённость, баллов	1	0/1		1/2	2/3	
Торосистость, баллов	1/2	2/3		3/4	4	
Разрушенность, баллов	2/3	3		3	3/4	
Сжатие, баллов				1/2		
Толщина льда	Максимальная	120-140	120-140	120-140	100-120	
	Характерная	90-100	90-100	100-110	60-80	
Преобладающий ветер	Направление	299,4	240,1	151,6	168,4	152,2
	Скорость, м/с	4,2	6,1	9,5	6,1	2,5
Пройденная дистанция, миль	517	208	702	382	667	
Время прохода, часов	36	37	44	77	48	
Средняя скорость, узлов	14,5	5,6	15,8	4,9	14,0	

Рис. 7. Фактические данные ледово-эксплуатационных показателей самостоятельного транзитного рейса газовоза «Владимир Русанов» в период 25 июня — 5 июля 2018 года с оценкой трудности

Последнее направление исследований было связано с изучением ледового плавания и разработкой методики автоматизированного выбора оптимальных маршрутов безледокольного плавания судов типа Arc7 в акватории СМП в зимний период. Этой разработкой занимались сотрудники лаборатории изучения ледового плавания ОЛРиП под руководством ст. научного сотрудника Е.И. Макарова.

В результате выполненных работ было предложено новое направление специализации прогностической ледовой информации для судоходства. В состав такой специализированной информации входят рекомендации по оптимальным вариантам плавания в Арктике в зимний период и элементы динамики ледяного покрова. Разработан принципиально новый подход для создания специализированной информации, допускающий автоматизацию основных этапов разработки. Создан ряд алгоритмов, оптимизирующих работу с разнородными исходными данными, в т. ч. алгоритм выделения динамических признаков состояния ледяного покрова и алгоритм выбора эффективных годов-гомологов. В основу алгоритма выбора годов-гомологов легла разработанная в рамках текущего проекта методика диагностики и идентификации ледяного покрова (ледяного покрова Арктики как среды судоходства).

Основой анализа исходных и прогноза ожидаемых условий ледового плавания в Арктике является метод выбора годов-гомологов. Системный подход при прогнозе условий ледового плавания на СМП основывается на квазисиноптическом методе выделения динамических структур в ледяном покрове СЛО, порождаемых долгопериодными волнами приливного характера, которые в свою очередь представляют собой суперпозицию волновой динамики океана. Локализация выделенных динамических структур и фазы их состояния служат фундаментом долгосрочного прогноза условий ледового

плавания. На основе предложенных алгоритмов и методов анализа и обобщения специализированной ледовой информации для судоходства разработана методика выбора оптимальных вариантов и маршрутов ледового плавания по СМП в зимний период.

Создано программное обеспечение для хранения баз данных, поиска и визуализации снимков ИСЗ в среде ГИС, массивов ИСЗ-снимков, а также две новые базы данных «Динамические элементы ледяного покрова и условий ледового плавания» и «Характеристики ледовых условий плавания на трассах СМП».

Были проведены авторские испытания алгоритма и методики разработки оптимальных маршрутов ледового плавания по СМП в зимний период. Проведена валидация корректности идентификации динамики ледяного покрова в периоды активизации волновой динамики, определяющей пространственно-временную локализацию оптимальных вариантов и маршрутов ледового плавания. Авторские испытания реализованы в виде рекомендаций, представленных в Штаб морских операций ФГБУ «Главсевморпуть» по оптимальным вариантам плавания судов Arc7 в 2022–2023 годах. Точность прогноза не выходит за пределы 12 % от фактических затрат времени на осуществление реальных морских операций, что по согласованию с потребителем является хорошим результатом (рис. 7).

Все поставленные задачи по темам выполнены на 100 %. По результатам разработки все методы и методики долгосрочных прогнозов внесены в заявку для ЦМКП Росгидромета на включение их в План производственных испытаний на 2025–2027 годы.

А.В. Юлин, А.Г. Егоров, В.В. Иванов, М.В. Третьяков, Г.В. Алексеев, Л.А. Тимохов, Е.И. Макаров, Т.В. Шевелева (АНИИ)