

Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
“ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ”

ИНФОРМАЦИОННЫЙ СБОРНИК

№ 40

Новые технологии, модели и методы гидрометеорологических прогнозов и результаты их оперативных испытаний

Под редакцией
канд. геогр. наук А.А. Алексеевой

2013

Информационный сборник № 40. Новые технологии, модели и методы гидрометеорологических прогнозов и результаты их оперативных испытаний / под редакцией канд. геогр. наук А.А. Алексеевой. – М., Обнинск: ИГ–СОЦИН, 2013. – 192 с.

Изложены результаты новых исследований по разработке методов краткосрочного прогноза наличия низкой облачности для авиации, шквалов и очень сильного ветра в градации опасных явлений в летний период года. Большая часть статей сборника посвящена разработке и внедрению методов морских гидрологических прогнозов: прогнозированию характеристик ветрового волнения для акваторий Азовского, Черного и Каспийского морей; расчету максимальных волн цунами для побережья Дальнего Востока Российской Федерации; прогнозу сроков окончательного разрушения припая в районах юго-западной части Чукотского моря и восточной части моря Лаптевых заблаговременностью до одного месяца; долгосрочному прогнозу ледовых условий на Белом и Азовском морях, прогнозу средней месячной ледовитости Охотского, Японского и Берингова морей с заблаговременностью до 1 года, фоновому прогнозу уровня Каспийского моря на срок 6 лет. Также включены статьи, посвященные развитию методов агрометеорологического прогноза: прогнозу урожайности и валового сбора ярового ячменя, овса по Новосибирской и Кемеровской областям, Алтайскому краю и урожайности яровой пшеницы по отдельным административным районам Новосибирской области, а также долгосрочному прогнозу теплообеспеченности вегетационного периода по территории Свердловской области.

Базой для научных разработок послужили как гидродинамические и физико-статистические модели, так и данные спутниковых измерений. Представлены результаты оперативных испытаний методов и рекомендации по их внедрению.

Для научных работников в области синоптической метеорологии, агрометеорологических и морских гидрологических прогнозов, морских прикладных исследований, специалистов службы прогноза погоды, аспирантов и студентов.

МЕТОД КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА НАЛИЧИЯ НИЗКОЙ ОБЛАЧНОСТИ ДЛЯ АВИАЦИИ

Введение

Наличие низкой облачности, высота ее нижней границы являются, наряду с горизонтальной видимостью, наиболее важными погодными характеристиками, ограничивающими нормальное функционирование авиации. Поэтому к точности их прогноза, и в частности прогноза наличия низкой облачности, предъявляются высокие требования. В настоящее время в мировой практике прогноз низкой облачности для авиации выполняется главным образом путем применения схем постпроцессинга модельных полей температуры, влажности и некоторых других величин. Схемы постпроцессинга, встроенные в прогностические численные модели, позволяют прогнозировать наличие (балл) низкой облачности в числе другой выходной продукции моделей. Реалистичный краткосрочный прогноз низкой облачности, отличающийся высокой пространственной и временной изменчивостью, возможен при достаточно высоком пространственном разрешении численной модели; он обычно разрабатывается в едином блоке с наукастингом и сверхкраткосрочным прогнозом. Так, развитая в США и оперативно используемая в Национальной службе погоды программа LAMP (Localized Aviation MOS Program) рассчитывает ежечасные (заблаговременностью до 25 ч) прогнозы ряда погодных характеристик, в том числе низкой облачности [4, 5]; прогностические соотношения, используемые для прогноза, широко используют данные наземной сети станций.

1. Сущность метода

С появлением в оперативной практике Росгидромета современных численных моделей появилась возможность разработки статистических методов постпроцессинга их продукции. Метод прогноза наличия низкой облачности был разработан в 2008–2010 гг. в Отделе авиационной метеорологии ФГБУ «Гидрометцентр России» [2].

В качестве реальных данных использованы аэродромные наблюдения на 45 аэродромах Европейской России и прилежащих территорий республик бывшего СССР за 2001–2008 гг. (обучающая выборка) и 2009–2010 гг. (независимая выборка) с временным разрешением 30 мин, реже – 1 ч. База аэродромных наблюдений была создана в Отделе путем декодирования

поступающих в ФГБУ «Гидрометцентр России» телеграмм в коде METAR. Данные аэродромных наблюдений из телеграмм уступают в точности и полноте аналогичным данным из дневников погоды: так, температура и точка росы в телеграммах передаются в целых градусах, а информация о формах облаков ограничивается указанием на характер облачности (конвективный либо неконвективный).

В качестве источника данных на стандартных изобарических поверхностях использовался объективный анализ атмосферных полей из базы ФГБУ «Гидрометцентр России» за сроки 0 и 12 ч ВСВ на географической сетке с шагом $2,5^\circ$ (до 2005 г.) и $1,25^\circ$ (с 2005 г.).

Выборки данных METAR были разделены на подвыборки с количеством низкой (≤ 1500 м) облачности: 0–3, ≥ 4 , ≥ 6 и 8 окт. Первая подвыборка считается объединяющей случаи «отсутствия низкой облачности», остальные обозначаются как НО4, НО6, НО8 соответственно.

В процессе анализа распределений повторяемости низкой облачности на конкретных аэродромах были замечены определенные черты сходства условий существования низкой облачности на некоторых аэродромах. Это сходство использовано для объединения аэродромов в группы, чтобы затем искать статистические зависимости в пределах групп, что увеличит статистическую обеспеченность результатов. Для разбиения всего набора аэродромов на группы был использован аппарат кластерного анализа. В качестве признаков, по которым оценивалось сходство условий различных аэродромов, были выбраны следующие характеристики: 1) средняя повторяемость низкой облачности по месяцам; 2) средняя за год повторяемость 5-процентных градаций относительной влажности на поверхности 925 гПа; 3) средняя за год повторяемость градаций вертикального градиента температуры в слое 925–850 гПа; 4) набор синоптических ситуаций (определяемых объективно с помощью программы, описанной в [3]), в которых наблюдается достаточно большое число случаев низкой облачности. Выбранные признаки характеризуют режим и наиболее общие черты условий существования низкой облачности на конкретном аэродроме. После ряда экспериментов было принято разбиение на семь кластеров методом «дерева» [1], представленное в табл. 1.

На следующем этапе был выполнен дискриминантный анализ по каждому кластеру, показавший, что наиболее информативными синхронными предикторами наличия низкой облачности являются относительная влажность на поверхности 925 гПа или у земли (z) и вертикальные градиенты температуры в слоях 925–850 гПа, земля–925 гПа и 850–700 гПа. Анализ проводился отдельно для каждого из двух предиктантов НО6 и НО8 (первый из которых представляет наибольший интерес с точки зрения метеорологического обеспечения

авиации). На зависимой выборке полученные дискриминантные функции дают вполне практически значимую успешность разделения случаев наличия и отсутствия явления по всем 45 аэродромам. Существенно, что градации количества облаков НО6 и НО8 определяются со сравнимой успешностью.

На независимой выборке был подтвержден в целом вполне значимый и достаточно высокий уровень успешности разделения случаев наличия и отсутствия низкой облачности в обеих градациях ее количества.

Таблица 1

Разбиение множества аэродромов на 7 кластеров и дискриминантные функции h_k для выборок случаев наличия и отсутствия НО4 по кластерам (RH – относительная влажность, γ – вертикальный градиент температуры, D^2 – квадрат расстояния Махаланобиса)

Кластеры	Аэродромы	$h_k = b_{k1}X_1 + b_{k2}X_2 + b_{k0}$	D^2
Кластер № 1 (9 аэродромов)	Брест, Львов, Кишинев, Одесса, Симферополь, Волгоград, Мин. Воды, Нальчик, Махачкала	$h_k = 0,052 RH_{925} - 0,70 \gamma_{925-850} - 3,03$	0,44
Кластер № 2 (3 аэродрома)	Краснодар, Ставрополь, Майкоп	$h_k = 0,047 RH_{925} + 0,61 \gamma_{z-925} - 3,16$	0,43
Кластер № 3 (5 аэродромов)	Мурманск, Салехард, Ханты-Мансийск, Анапа, Сочи	$h_k = 0,015 RH_z + 0,04 RH_{925} - 3,73$	0,34
Кластер № 4 (5 аэродромов)	Домодедово, Самара, Луганск, Запорожье, Ростов-на-Дону	$h_k = 0,058 RH_z + 1,81 \gamma_{z-925} - 4,81$	0,51
Кластер № 5 (8 аэродромов)	Архангельск, Сыктывкар, Внуково, Шереметьево, Казань, Ульяновск, Нижнекамск, Уфа	$h_k = 0,061 RH_{925} - 0,57 \gamma_{925-850} - 4,03$	0,50
Кластер № 6 (7 аэродромов)	Таллинн, Рига, Вильнюс, Минск, Н. Новгород, Саратов, Харьков	$h_k = 0,072 RH_{925} - 0,84 \gamma_{925-850} - 4,53$	0,57
Кластер № 7 (8 аэродромов)	Санкт-Петербург, Гомель, Киев, Кривой Рог, Воронеж, Днепропетровск, Донецк, Астрахань	$h_k = 0,068 RH_z + 2,03 \gamma_{z-925} - 5,74$	0,54

2. Прогноз наличия низкой облачности по аэродрому

Полученные дискриминантные функции затем были применены к задаче прогноза низкой облачности по прогностическим (на 12 и 24 ч) модельным значениям предикторов. Оценки успешности таких прогнозов были получены для глобальной модели ПЛАВ (ФГБУ «Гидрометцентр России») с шагом $0,256^\circ$ по широте и $0,56^\circ$ по долготе и мезомасштабной модели COSMO-RU07 с шагом по горизонтали 7 км, а также для модели NCEP (США) с шагом 1° по широте и долготе. Для первой из перечисленных моделей были заархивированы как прогностические, так и начальные (объективный анализ) поля предикторов за период с июля 2010 по июль 2011 г., для второй – аналогичные поля с января 2009 по июль 2011 г. Расчеты показали, что успешность прогноза наличия низкой облачности по выходным

данным COSMO-RU07 заметно выше, чем по ПЛАВ. В частности, для НО8 при прогнозе на 24 ч по COSMO-RU07 получены значения критерия качества Пирси-Обухова $PI < 0,30$ только в Мурманске и Ханты-Мансийске, тогда как по ПЛАВ – по 11 аэродромам. Средние значения PI по всем 45 аэродромам для НО6 составили 0,47 и 0,36 по COSMO-RU07 и ПЛАВ соответственно. Результаты прогноза наличия низкой облачности, полученные по выходным данным модели NCEP, близки к таковым для модели COSMO-RU07. Именно среднее значение PI при прогнозе НО6 на 24 ч составляет 0,45, причем в трех пунктах – Мурманск, Салехард и Ханты-Мансийск оказалось $PI < 0,30$.

Таким образом, полученные на материалах аэродромных наблюдений прогностические соотношения для прогноза низкой облачности более 6 и 8 окт показали практически значимую успешность при использовании модельных значений предикторов, что указывает на целесообразность практического применения разработанных статистических соотношений.

3. Прогноз наличия низкой облачности по территории Европейской России

Для построения карты особых явлений на нижних уровнях для авиации недостаточно сформулировать прогноз в конечном числе точек, соответствующих положению аэродромов. Прогноз должен быть дан во всех узлах сетки на всей области прогноза.

Отдавая себе отчет в наличии локальных влияний (роль которых хорошо видна на примере трех московских аэродромов), авторы метода по необходимости приняли предположение о возможности распространения условий существования низкой облачности на аэродроме на некоторую окрестность последнего. Была предложена «мозаичная» схема прогноза низкой облачности по всей области расчета. Согласно этой схеме, линейная дискриминантная функция, полученная для определенного кластера, применяется не только для прогноза в узлах сетки, ближайших к аэродромам, входящим в данный кластер, но и ко всем узлам модельной сетки в окрестностях этих аэродромов. Таким образом, вся область (европейская часть бывшего СССР, исключая Кавказ и Закавказье) представляется в виде мозаики (рисунок), на элементах которой в каждом узле сетки производится расчет наличия НО6 или НО8 по линейным дискриминантным функциям для соответствующего кластера.

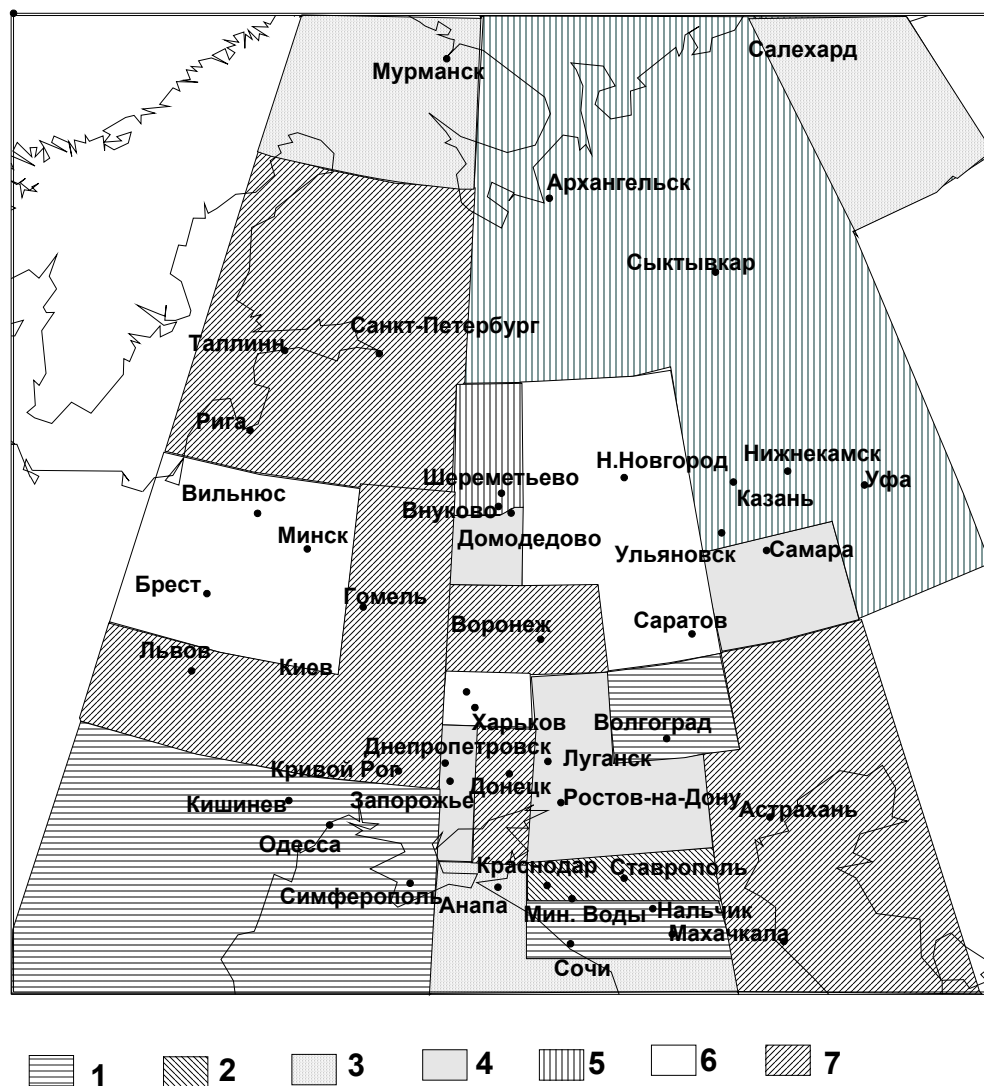


Рисунок. Разбиение территории европейской части бывшего СССР на участки для расчета карты наличия низкой облачности по дискриминантным функциям для семи кластеров (номера кластеров указаны в нижней части рисунка).

4. Оперативные испытания

На испытания выносился метод прогноза наличия низкой облачности по территории, включающей Европейскую Россию и прилегающие европейские территории республик бывшего СССР в следующих границах: 27° в.д., 65° в.д., 45° с.ш., 75° с.ш. В качестве предиктанта рассматривается наличие либо отсутствие облаков с нижней границей не выше 1500 м в количестве не менее 6 окт. В качестве предикторов используются прогностические (с заблаговременностью 12 и 24 ч) поля температуры и влажности моделей ПЛАВ и COSMO-RU07.

Расчет дискриминантных функций в узлах модельных сеток по схеме, представленной на рисунке, производится как по начальным, так и по прогностическим полям температуры и

влажности по модели ПЛАВ (программа сдана в АСООИ). Результаты расчета в виде значений дихотомической переменной в узлах сетки записываются в базу данных LAG-2 каждые 12 ч. Аналогично получаются результаты расчета на сетке COSMO-RU07. Для оценки точности прогноза необходимо сравнить результаты расчета в узлах сетки по прогностическим и начальным (на момент прогноза) полям на всей области расчета. Оценка степени соответствия расчетов по полям анализа и прогноза будет представлять собой оценку успешности прогноза низкой облачности (по области) относительно ее диагноза, принимаемого за факт. Такая оценка представляет собой, по существу, оценку успешности прогноза предикторов низкой облачности с соответствующей заблаговременностью.

Предусмотрена также оценка успешности прогноза низкой облачности по отдельным аэродромам с использованием в качестве факта наличия низкой облачности информации из телеграмм в коде METAR в момент прогноза. Для этой цели выбраны 30 российских аэродромов с дискретностью наблюдений, равной 30 мин, и определены ближайшие к ним узлы сетки модели COSMO-RU07, результаты расчета в которых сравнивались с наблюдениями на аэродромах. По техническим причинам аналогичное сравнение для модели ПЛАВ проводилось только для 23 аэродромов.

Испытания метода прогноза низкой облачности по модели ПЛАВ проводились в период, включавший 732 срока, с 1 мая 2011 г., по модели COSMO-RU07 – с 1 июля 2011 г. по 30 апреля 2012 г. (610 сроков).

5. Результаты испытаний метода

В табл. 2 представлены результаты испытаний прогноза НО6 по территории. Как видно из таблицы, все характеристики оправдываемости, включая критерии качества Пирси-Обухова (PI) и Хайдке-Багрова (H_B), указывают на высокое качество прогноза наличия низкой облачности. Как уже сказано выше, это означает, что предикторы дискриминантных функций предсказываются моделями с высокой точностью.

Результаты испытаний метода прогноза наличия низкой облачности по конкретным аэродромам на основе выходных данных модели ПЛАВ приведены в табл. 3–5 для заблаговременностей 0, 12 и 24 ч, в табл. 6–8 даны аналогичные результаты по модели COSMO-RU07. Оправдываемость прогноза наличия явления в среднем несколько выше по модели COSMO-RU07, предупреденность наличия явления выше по модели ПЛАВ, но при этом выше и процент ложных тревог. Критерии PI и H_B практически одинаковы при заблаговременностях 0 и 12 ч, но при заблаговременности 24 ч модель COSMO-RU07 дает заметно лучшие результаты: ниже процент ложных тревог, выше PI и H_B . В целом следует

признать, что обе модели пригодны для прогноза на их основе низкой облачности по рассматриваемой территории и по аэродромам.

Таблица 2

**Успешность прогноза низкой облачности ≥ 6 окт по территории
с заблаговременностью 12 и 24 ч по моделям COSMO-RU07 и ПЛАВ**

Модель, заблаговре- менность	Число узлов	Повторя- емость, %	Оправдывае- мость, %		Предупрежден- ность, %		Ложн. тревоги, %	PI	Н _Б
			налич	отсут	налич	отсут.			
ПЛАВ, 12 ч	1344223	59,3	89,0	85,4	90,2	83,9	11,0	0,74	0,74
ПЛАВ, 24 ч	1342374	59,3	87,6	82,3	87,9	81,8	12,4	0,70	0,70
COSMO, 12 ч	102805200	51,0	85,5	85,7	86,4	84,7	14,4	0,71	0,71
COSMO, 24 ч	105009600	50,3	83,5	84,8	85,3	83,0	16,5	0,68	0,68

6. Точность прогноза облачности в модели COSMO-RU07

Представляет интерес сравнение точности прогнозов облачности ≥ 6 окт испытываемым методом с результатами аналогичных прогнозов непосредственно в модели COSMO-RU07 (насколько нам известно, оценка успешности прогноза облачности по данной модели произведена впервые). В период испытаний имелась возможность оперативного сравнения методического и модельного прогнозов. Модельная облачность отличается от регистрируемой на аэродромах: она определяется как наличие продуктов конденсации влаги в слое от земли до поверхности 800 гПа. Сравнивая модельную облачность с наблюдаемой, мы оцениваем, насколько они близки друг к другу и, значит, можно ли интерпретировать модельную облачность непосредственно как наблюдаемую.

Оценка успешности модельных прогнозов облачности в указанном выше смысле производилась по тем же аэродромам, что и методических, представленных в табл. 6–8. Результаты оценки представлены в табл. 9–11. Из таблиц видно, что модельный прогноз облачности на оба срока (12 и 24 ч) является значимым ($PI = H_B = 0,48$ при прогнозе на сутки), хотя методический прогноз более успешен. Это видно и по значениям PI и H_Б, и особенно по более низкой (66,5 %) предупреденности наличия явления (против 77,7 % у методического прогноза), что означает больший процент непредсказанных явлений (33,5 % против 22,3 %).

Следует сделать вывод, что модельный прогноз низкой облачности является практически значимым, однако уступает аналогичному прогнозу, развитому в ФГБУ «Гидрометцентр России» статистическим методом, что подтверждается результатами, полученными в период оперативных испытаний, особенно в отношении такой важной характеристики, как предупреденность явления.

Заключение

Как показали оперативные испытания, статистический метод прогноза наличия низкой облачности ≥ 6 окт с нижней границей ≤ 1500 м, разработанный на реальных данных (аэродромные наблюдения и объективный анализ), т. е. в рамках концепции РР, обеспечивает практически значимые и достаточно высокие результаты на выходных данных моделей ПЛАВ и COSMO-RU07.

В процессе оперативных испытаний также показано, что «облачность нижнего яруса», прогнозируемая в модели COSMO-RU07, обнаруживает практически значимый уровень согласия с наблюдениями на аэродромах, но с более низкой предупреденностью наличия явления, в сравнении со статистическим методом. На этом основании можно сделать вывод, с одной стороны, о возможности использования модельного прогноза на практике (но с учетом того, что из каждых трех явлений предсказаны будут только два); с другой стороны, о наличии определенных перспектив дальнейшего усовершенствования прогноза низкой облачности при использовании модельной облачности в качестве одного из предикторов (концепция MOS). Предварительные оценки за период испытаний показали, что таким путем удастся несколько повысить успешность модельного прогноза.

Центральная методическая комиссия по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета (ЦМКП) в своем решении от 13 июня 2012 г. отметила, что в ФГБУ «Гидрометцентр России» ведется постоянная работа по созданию автоматизированных методов прогноза опасных для авиации явлений и выпуску прогностических карт для использования при метеорологическом обеспечении авиации. Представленный к рассмотрению ЦМКП метод прогноза по выходным данным глобальной полулагранжевой модели (ПЛАВ) и мезомасштабной модели COSMO-RU07 наличия низкой (с нижней границей не выше 1500 м при количестве облаков не менее 6 окт) облачности разработан в рамках темы НИР 1.4.1 (2008–2010 гг.), предусматривавшей создание технологии выпуска прогностических карт особых явлений погоды на нижних уровнях для авиации; технология подготовлена к внедрению в 2011 г., ее внедрение связывается с перспективой утверждения новых ФАППП. Представленный метод позволяет прогнозировать с высокой оправдываемостью наличие низкой облачности по выходным данным указанных выше моделей с заблаговременностью 12 и 24 ч по Европейской территории России, стран СНГ и Балтии и по 30 аэродромам в пределах данной территории.

Эффективность представленного метода прогноза наличия низкой облачности по конкретным аэродромам оценена путем сравнения прогнозируемого наличия или отсутствия явления в ближайшем к аэродрому узле модельной сетки с наблюдениями на аэродроме в

срок прогноза в течение периода оперативных испытаний (май 2011 – апрель 2012 г. для модели ПЛАВ и июль 2011 – апрель 2012 г. для модели COSMO-RU07); эффективность прогноза по территории оценена путем сравнения прогнозируемого наличия либо отсутствия явления с аналогичным расчетом по начальным полям модели в срок прогноза. Показатели успешности, согласно оперативным испытаниям (критерии Пирси-Обухова и Хайдке-Багрова), высокие в обоих вариантах метода (по конкретным аэродромам и по территории).

ЦМКП одобрила работу ФГБУ «Гидрометцентр России» по созданию метода прогноза наличия низкой облачности по выходным данным глобальной полулагранжевой модели ПЛАВ и мезомасштабной модели COSMO-RU07 и рекомендовала использовать разработанный метод прогноза наличия низкой облачности по выходным данным моделей ПЛАВ и COSMO-RU07 в качестве основного расчетного метода при прогнозировании условий полета на нижних уровнях для авиации. Также ЦМКП постановила считать целесообразной организацию выпуска в ФГБУ «Гидрометцентр России» карт особых явлений на нижних уровнях для использования при метеообеспечении авиации. ФГБУ «Гидрометцентр России» рекомендовано продолжить работу по развитию метода прогноза наличия низкой облачности по выходным данным модели COSMO-RU с другими вариантами горизонтального разрешения и над другими территориями.

Список литературы

1. Прикладная статистика: классификация и снижение размерности / под ред. С.А. Айвазяна – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
2. Ветрова Е.И., Скриптунова Е.Н., Шакина Н.П. Режим низкой облачности и ее прогноз на аэродромах европейской территории бывшего СССР // Метеорология и гидрология. – 2013. – № 1. – С. 2–31.
3. Шакина Н.П., Калугина Г.Ю., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р. Субъективный и объективный анализы атмосферных фронтов. 1. Объективные характеристики фронтов, проведенных синоптиками // Метеорология и гидрология. – 1998. – № 7. – С. 19–30.
4. Ghirardelli J.E.: An overview of the redeveloped Localized Aviation MOS (LAMP) for short-range forecasting. – 2005. – <http://ams.confex.com.ams/pdf/papers/95038.pdf>.
5. Rudack D.E., Ghirardelli J.E. A comparative verification of localized aviation model output statistic program (LAMP) and numerical weather prediction (NWP) model forecasts of ceiling height and visibility // Wea. Forec. – 2010. – Vol. 25. – P. 1161 – 1178.

Таблица 3

**Успешность расчета по начальным полям модели ПЛАВ («идеальный прогноз») наличия
низкой (ВНГО ≤1500 м) облачности ≥ 6 окт за период с мая 2011 по апрель 2012 г.**

Аэродромы	Повтор. явлен.	Оправдываемость, %		Предупрежденность, %		Ложн. тревоги, %	PI	Н _Б	Число случ.
		налич.	отсут.	налич.	отсут.				
Архангельск	0,468	70,1	84,	85,5	67,8	29,9	0,53	0,53	532
Сыктывкар	0,385	57,6	84,7	81,9	62,3	42,4	0,44	0,41	720
С.Петербург	0,547	75,1	74,9	81,4	67,3	24,9	0,51	0,52	728
Минск	0,547	75,1	74,9	81,4	67,3	24,9	0,49	0,49	716
Н.Новгород	0,474	77,5	90,6	91,3	76,1	22,5	0,67	0,67	724
Шереметьево	0,455	74,4	90,1	90,3	74,1	25,6	0,64	0,63	701
Внуково	0,498	76,6	84,6	86,5	73,7	23,4	0,60	0,60	713
Казань	0,420	72,3	93,8	93,3	74,1	27,7	0,67	0,65	707
Домодедово	0,439	73,1	91,5	91,3	73,7	26,9	0,65	0,63	704
Нижнекамск	0,319	56,7	93,8	90,4	67,7	43,4	0,58	0,50	618
Уфа	0,485	73,8	82,4	83,6	72,1	26,2	0,56	0,56	668
Самара	0,320	62,9	96,3	94,0	73,9	37,1	0,68	0,60	728
Одесса	0,351	63,5	88,0	81,2	74,8	36,5	0,56	0,53	727
Симферополь	0,376	60,1	88,1	85,3	65,9	39,9	0,51	0,47	723
Воронеж	0,449	71,4	85,4	84,8	72,4	28,6	0,57	0,56	688
Харьков	0,548	71,8	74,4	82,9	60,6	28,3	0,43	0,44	724
Днепропетровск	0,350	47,4	83,1	80,4	51,9	52,6	0,32	0,28	700
Донецк	0,445	59,4	74,6	75,0	58,9	40,6	0,34	0,33	728
Луганск	0,414	63,3	86,3	85,4	64,9	36,7	0,50	0,48	647
Ростов-на-Дону	0,292	52,2	89,2	79,5	70,0	47,8	0,50	0,43	720
Астрахань	0,267	55,0	94,2	87,6	73,9	45,0	0,61	0,52	726
Краснодар	0,379	62,2	86,1	81,5	69,7	37,8	0,51	0,48	728
Майкоп	0,252	38,7	89,8	80,9	56,9	61,3	0,38	0,28	726
Среднее	0,411	65,1	86,9	85,3	68,0	34,9	0,53	0,51	16096

Таблица 4

**Успешность прогноза наличия низкой (ВНГО ≤ 1500 м) облачности ≥ 6 окт с
заблаговременностью 12 ч по модели ПЛАВ за период с мая 2011 по апрель 2012 г.**

Аэродромы	Повтор. явлен.	Оправдывае- мость, %		Предупрежден- ность, %		Ложн. тревоги, %	PI	Н _Б	Число случ.
		налич.	отсут.	налич.	отсут.				
Архангельск	0,467	70,8	79,0	78,2	71,7	29,2	0,50	0,50	531
Сыктывкар	0,384	57,3	84,4	81,5	62,1	42,7	0,44	0,40	719
С.Петербург	0,538	72,8	79,0	85,7	62,8	27,2	0,48	0,49	727
Минск	0,547	76,9	77,7	83,4	69,8	23,1	0,53	0,54	715
Н.Новгород	0,474	72,1	88,2	89,8	68,7	27,9	0,59	0,58	723
Шереметьево	0,456	73,3	87,7	87,8	73,2	26,7	0,61	0,60	700
Внуково	0,499	77,3	84,8	86,5	74,8	22,7	0,61	0,61	712
Казань	0,419	70,8	93,7	93,2	72,2	29,2	0,65	0,63	706
Домодедово	0,440	72,5	88,0	87,1	74,1	27,5	0,61	0,60	703
Нижнекамск	0,319	55,3	93,0	89,3	66,3	44,7	0,56	0,48	618
Уфа	0,484	74,4	78,6	78,3	74,7	25,6	0,53	0,53	667
Самара	0,319	60,6	95,2	92,2	71,9	39,4	0,64	0,56	727
Одесса	0,350	62,4	84,6	74,4	75,8	37,6	0,50	0,48	726
Симферополь	0,375	60,4	88,0	84,9	66,5	39,6	0,51	0,48	722
Воронеж	0,450	72,6	87,1	86,7	73,3	27,4	0,60	0,59	687
Харьков	0,549	75,4	75,3	81,9	67,5	24,6	0,49	0,50	723
Днепропетровск	0,351	61,2	84,5	74,7	74,4	38,8	0,49	0,47	699
Донецк	0,446	72,0	80,3	76,9	75,9	28,0	0,53	0,52	727
Луганск	0,415	64,7	87,8	86,9	66,4	35,3	0,53	0,51	646
Ростов-на-Дону	0,292	48,9	86,7	74,8	67,8	51,1	0,42	0,37	719
Астрахань	0,268	53,9	91,7	81,4	74,6	46,1	0,56	0,48	725
Краснодар	0,380	62,1	85,6	80,8	69,8	37,9	0,51	0,48	727
Майкоп	0,252	36,8	89,4	81,4	53,0	63,1	0,34	0,25	725
Среднее	0,411	65,8	85,9	83,6	69,7	34,2	0,53	0,51	16074

Таблица 5

**Успешность прогноза наличия низкой (ВНГО ≤ 1500 м) облачности ≥ 6 окт с
заблаговременностью 24 ч по модели ПЛАВ за период с мая 2011 по апрель 2012 г.**

Аэродромы	Повтор. явлен.	Оправдывае- мость, %		Предупрежден- ность, %		Ложн. тревоги, %	PI	Н _б	Число случ.
		налич.	отсут.	налич.	отсут.				
Архангельск	0,466	70,3	76,0	73,7	72,8	29,7	0,46	0,46	530
Сыктывкар	0,384	54,1	82,0	79,7	57,7	45,9	0,37	0,34	718
С.Петербург	0,537	72,3	77,0	83,8	62,8	27,7	0,47	0,47	726
Минск	0,546	76,0	75,9	81,8	68,8	24,0	0,51	0,51	714
Н.Новгород	0,474	69,1	85,4	87,7	64,7	30,9	0,52	0,52	722
Шереметьево	0,456	70,2	83,9	84,0	70,0	29,8	0,54	0,53	699
Внуково	0,499	75,1	81,4	83,4	72,5	24,9	0,56	0,56	711
Казань	0,418	71,2	92,9	92,2	73,2	28,8	0,65	0,63	705
Домодедово	0,440	68,9	85,4	84,9	70,0	31,1	0,55	0,54	702
Нижнекамск	0,319	55,1	92,1	87,8	66,5	44,9	0,54	0,47	618
Уфа	0,483	74,3	76,7	75,5	75,6	25,7	0,51	0,51	666
Самара	0,320	59,9	95,9	93,5	70,6	40,1	0,64	0,56	726
Одесса	0,349	61,1	85,7	77,1	73,7	38,9	0,51	0,48	725
Симферополь	0,374	61,6	87,4	83,3	69,0	38,4	0,52	0,49	721
Воронеж	0,450	72,0	84,0	83,2	72,1	29,0	0,55	0,54	686
Харьков	0,548	72,3	67,3	73,7	65,6	27,7	0,39	0,40	722
Днепропетровск	0,351	60,3	85,8	78,0	72,2	39,7	0,50	0,47	698
Донецк	0,446	70,1	82,0	80,2	72,4	29,9	0,53	0,52	726
Луганск	0,414	64,4	83,3	80,5	68,5	35,6	0,49	0,47	645
Ростов-на-Дону	0,292	51,7	86,8	73,8	71,5	48,3	0,45	0,40	718
Астрахань	0,268	53,9	90,7	78,9	75,3	46,1	0,54	0,47	724
Краснодар	0,380	61,4	83,4	77,2	70,2	38,6	0,47	0,45	726
Майкоп	0,253	35,1	87,4	78,1	51,2	64,9	0,29	0,21	724
Среднее	0,411	64,6	84,2	81,5	68,8	35,4	0,50	0,48	16052

Таблица 6

**Успешность расчета наличия низкой облачности ≥ 6 окт по начальным полям
модели COSMO-RU07 за период с июля 2011 по апрель 2012 г.**

Аэродромы	Повтор. явлен.	Оправдывае- мость, %		Предупрежден- ность, %		Ложн. тревоги, %	PI	Число случ.
		налич.	отсут.	налич.	отсут.			
Архангельск	0,475	76,4	79,7	78,0	78,2	23,6	0,52	402
Салехард	0,136	28,8	96,3	83,6	67,5	71,2	0,51	537
Сыктывкар	0,419	62,1	81,2	79,0	65,3	37,9	0,44	535
Таллинн	0,564	82,9	65,8	66,9	82,2	17,1	0,49	541
С.Петербург	0,549	79,2	67,5	69,1	78,0	20,8	0,47	543
Рига	0,494	83,3	76,4	72,8	85,8	16,7	0,59	543
Вильнюс	0,591	82,5	63,9	69,2	78,8	17,5	0,48	543
Минск	0,571	79,7	65,3	69,5	76,4	20,3	0,46	534
Н.Новгород	0,481	80,3	79,5	76,9	82,6	19,7	0,60	541
Шереметьево	0,481	74,0	85,5	86,9	71,7	26,0	0,59	524
Внуково	0,522	80,5	79,9	81,9	78,3	19,5	0,60	531
Казань	0,422	82,5	87,5	82,9	87,2	17,5	0,70	526
Домодедово	0,462	77,9	81,4	78,5	80,9	22,1	0,59	524
Нижнекамск	0,319	60,9	89,3	80,5	75,8	39,1	0,56	467
Уфа	0,491	77,7	75,9	73,9	79,5	22,3	0,53	499
Самара	0,328	72,1	91,6	84,3	84,1	27,9	0,68	543
Одесса	0,368	62,9	83,3	74,5	74,3	37,1	0,49	54,3
Симферополь	0,372	73,0	77,7	57,7	87,4	27,0	0,45	541
Воронеж	0,464	67,4	84,7	86,7	63,7	32,6	0,50	519
Харьков	0,546	73,2	68,8	74,7	67,1	26,8	0,42	542
Днепропетровск	0,358	67,2	82,7	69,7	81,0	32,8	0,51	525
Донецк	0,451	75,1	80,3	76,3	79,2	24,9	0,56	543
Луганск	0,415	71,2	80,6	73,3	79,0	28,8	0,52	496
Ростов-на-Дону	0,287	57,6	89,9	78,6	76,8	42,4	0,55	537
Астрахань	0,258	57,6	90,5	75,7	80,6	42,4	0,56	542
Краснодар	0,366	71,2	82,1	68,3	84,0	28,8	0,52	543
Майкоп	0,262	47,5	88,7	74,6	70,7	52,5	0,45	541
Мин. Воды	0,438	70,4	74,2	64,9	78,7	29,6	0,44	527
Сочи	0,248	59,0	83,6	46,8	89,3	41,0	0,36	509
Нальчик	0,318	44,0	79,5	66,5	60,6	56,0	0,27	506
Среднее	0,415	70,0	80,8	74,1	77,4	30,0	0,52	15747

Таблица 7

**Успешность прогноза наличия низкой облачности ≥ 6 окт с заблаговременностью 12 ч
по модели COSMO-RU07 за период с июля 2011 по апрель 2012 г.**

Аэродромы	Повтор. явлен.	Оправдывае- мость, %		Предупрежден- ность, %		Ложн. тревоги, %	PI	Н _Б	Число случ.
		налич.	отсут.	налич.	отсут.				
Архангельск	0,482	67,8	78,2	80,8	64,3	32,2	0,45	0,45	400
Салехард	0,137	26,2	95,4	80,6	64,1	73,8	0,45	0,24	526
Сыктывкар	0,422	56,6	80,4	81,9	54,1	43,4	0,36	0,34	524
Таллинн	0,559	86,6	72,2	74,1	85,5	13,4	0,60	0,58	531
С.Петербург	0,545	77,6	74,3	79,0	72,7	22,4	0,52	0,52	532
Рига	0,496	80,6	79,6	78,8	81,3	19,4	0,60	0,60	532
Вильнюс	0,598	84,6	69,1	76,1	79,4	15,4	0,56	0,54	532
Минск	0,570	82,5	73,5	78,9	77,8	17,5	0,57	0,56	523
Н.Новгород	0,485	79,0	84,6	84,8	78,8	21,0	0,64	0,63	530
Шереметьево	0,487	72,6	87,7	90,0	67,7	27,4	0,58	0,57	513
Внуково	0,530	81,8	80,5	83,0	79,2	18,2	0,62	0,62	521
Казань	0,434	80,3	87,2	83,9	84,2	19,7	0,68	0,68	516
Домодедово	0,478	76,3	82,1	81,6	76,9	23,7	0,58	0,58	513
Нижнекамск	0,329	61,7	88,8	80,7	75,5	38,3	0,56	0,52	456
Уфа	0,497	82,1	74,1	70,0	85,0	17,9	0,55	0,55	489
Самара	0,327	65,3	90,1	82,2	78,8	34,7	0,61	0,57	532
Одесса	0,368	65,3	83,5	74,0	77,1	34,7	0,51	0,50	532
Симферополь	0,375	75,1	80,7	65,3	87,0	24,9	0,52	0,54	530
Воронеж	0,458	70,1	87,0	87,9	68,2	29,9	0,56	0,55	506
Харьков	0,552	75,7	76,2	82,9	67,2	24,3	0,50	0,51	531
Днепропетровск	0,359	67,3	84,6	73,9	79,9	32,7	0,54	0,53	513
Донецк	0,455	79,2	83,3	80,2	82,4	20,8	0,63	0,62	532
Луганск	0,414	70,9	80,3	72,6	78,9	29,1	0,52	0,51	485
Ростов-на-Дону	0,283	54,8	90,6	80,5	73,8	45,2	0,54	0,48	527
Астрахань	0,269	59,3	88,8	71,3	82,0	40,7	0,53	0,50	531
Краснодар	0,376	74,5	81,9	68,5	85,8	25,5	0,54	0,55	532
Майкоп	0,262	49,0	86,9	68,3	74,7	51,0	0,43	0,38	531
Мин. Воды	0,443	72,5	76,3	69,0	79,2	27,5	0,48	0,48	517
Сочи	0,244	51,7	87,0	62,3	81,3	48,3	0,44	0,41	501
Нальчик	0,325	55,0	83,0	68,9	72,8	45,0	0,42	0,39	496
Среднее	0,419	70,4	82,6	77,7	76,5	29,6	0,54	0,53	15434

Таблица 8

**Успешность прогноза наличия низкой облачности ≥ 6 окт с заблаговременностью 24 ч
по модели COSMO-RU07 за период с июля 2011 по апрель 2012 г.**

Аэродромы	Повтор. явлен	Оправдываемость, %		Предупрежденность, %		Ложн. тревоги, %	PI	Н _Б	Число случ.
		налич.	отсут.	налич.	отсут.				
Архангельск	0,485	67,6	78,2	81,3	63,3	32,4	0,56	0,56	408
Салехард	0,130	23,4	95,8	82,9	59,3	76,6	0,51	0,28	537
Сыктывкар	0,411	54,0	78,9	80,0	52,4	46,0	0,44	0,43	535
Таллинн	0,556	78,2	68,6	72,8	74,6	21,8	0,49	0,47	541
С.Петербург	0,547	75,0	71,1	76,8	69,1	25,0	0,47	0,46	543
Рига	0,501	77,8	73,9	72,1	79,3	22,2	0,59	0,59	543
Вильнюс	0,589	84,9	71,3	77,5	80,3	15,1	0,48	0,46	543
Минск	0,567	85,0	75,8	80,2	81,4	15,0	0,46	0,45	534
Н.Новгород	0,486	78,7	83,0	82,9	78,8	21,3	0,60	0,60	541
Шереметьево	0,484	71,8	85,5	87,7	67,8	28,2	0,59	0,58	523
Внуково	0,530	79,3	78,5	81,6	76,0	20,7	0,60	0,60	532
Казань	0,433	78,1	87,5	84,6	81,9	21,9	0,70	0,70	526
Домодедово	0,472	78,6	84,0	83,1	79,8	21,4	0,59	0,59	525
Нижнекамск	0,328	62,2	91,1	85,0	74,8	37,8	0,56	0,52	467
Уфа	0,494	81,0	74,6	70,9	83,8	19,0	0,53	0,54	500
Самара	0,331	63,2	92,5	87,8	74,7	36,8	0,68	0,66	542
Одесса	0,368	61,4	84,0	76,5	72,0	38,6	0,49	0,47	543
Симферополь	0,379	76,7	80,2	64,4	88,1	23,3	0,45	0,47	541
Воронеж	0,470	69,9	85,9	87,7	66,5	30,1	0,50	0,49	519
Харьков	0,548	76,3	79,8	85,9	67,8	23,7	0,42	0,42	541
Днепропетровск	0,359	63,9	85,3	76,7	75,7	36,1	0,51	0,50	526
Донецк	0,460	77,1	81,0	78,0	80,2	22,9	0,56	0,55	543
Луганск	0,411	66,8	81,4	76,0	73,6	33,2	0,52	0,52	496
Ростов-на-Дону	0,287	53,3	89,1	77,9	72,6	46,7	0,55	0,50	537
Астрахань	0,268	61,8	89,2	72,4	83,6	38,2	0,56	0,51	542
Краснодар	0,383	75,4	80,6	66,3	86,6	24,6	0,52	0,53	543
Майкоп	0,262	48,7	86,6	67,6	74,7	51,3	0,45	0,38	541
Мин. Воды	0,449	76,9	74,6	64,8	84,1	23,1	0,44	0,44	526
Сочи	0,245	47,9	87,1	64,8	77,2	52,1	0,36	0,39	511
Нальчик	0,323	58,8	84,7	71,3	76,1	41,2	0,27	0,24	507
Среднее	0,419	69,2	82,3	77,6	75,1	30,8	0,51	0,51	15758

Таблица 9

Успешность модельной облачности ≥ 6 окт в начальных полях модели COSMO-RU07

за период с июля 2011 по апрель 2012 г.

Аэродромы	Повтор. явлен.	Оправдывае- мость, %		Предупрежден- ность, %		Ложн. тревоги, %	PI	Н _Б	Число случ.
		налич.	отсут.	налич.	отсут.				
Архангельск	0,475	80,0	77,5	73,3	83,4	20,0	0,57	0,57	402
Салехард	0,136	21,9	93,4	74,0	58,4	78,1	0,32	0,16	537
Сыктывкар	0,419	61,5	80,7	78,6	64,6	38,5	0,43	0,42	535
Таллинн	0,564	81,9	61,3	59,3	83,1	18,1	0,42	0,41	541
С.Петербург	0,549	79,6	64,7	64,1	80,0	20,4	0,44	0,43	543
Рига	0,494	85,6	73,4	66,8	89,1	14,4	0,56	0,56	543
Вильнюс	0,591	83,4	59,4	61,1	82,4	16,6	0,44	0,41	543
Минск	0,571	81,6	60,5	59,7	82,1	18,4	0,42	0,40	534
Н.Новгород	0,481	82,5	77,0	72,3	85,8	17,5	0,58	0,58	541
Шереметьево	0,481	78,1	75,9	72,2	81,2	21,9	0,54	0,54	524
Внуково	0,522	82,6	73,1	71,8	83,5	17,4	0,55	0,55	531
Казань	0,422	82,0	83,4	76,1	87,8	18,0	0,64	0,65	526
Домодедово	0,462	81,1	78,5	72,7	85,5	18,9	0,58	0,59	524
Нижнекамск	0,319	61,2	87,0	75,2	77,7	38,8	0,53	0,50	467
Уфа	0,491	79,3	65,7	53,1	86,6	20,7	0,40	0,40	499
Самара	0,328	74,7	88,4	76,4	87,4	25,3	0,64	0,63	543
Одесса	0,368	76,0	75,4	49,0	91,0	24,0	0,40	0,43	54,3
Симферополь	0,372	72,3	74,0	46,8	89,4	27,7	0,36	0,39	541
Воронеж	0,464	79,1	69,7	56,4	87,1	20,9	0,44	0,44	519
Харьков	0,546	81,5	57,5	46,3	87,4	18,5	0,34	0,32	542
Днепропетровск	0,358	72,0	76,3	50,5	89,0	28,0	0,40	0,42	525
Донецк	0,451	81,4	71,0	55,5	89,6	18,6	0,45	0,46	543
Луганск	0,415	74,9	75,4	60,7	85,5	25,1	0,46	0,48	496
Ростов-на-Дону	0,287	63,6	86,4	66,9	84,6	36,4	0,52	0,51	537
Астрахань	0,258	62,0	85,5	57,1	87,8	38,0	0,45	0,46	542
Краснодар	0,366	79,8	76,8	51,8	92,4	20,2	0,44	0,48	543
Майкоп	0,262	59,3	83,5	51,4	87,5	40,7	0,39	0,41	541
Мин. Воды	0,438	81,5	71,3	53,2	90,5	18,5	0,44	0,46	527
Сочи	0,248	57,4	78,6	21,4	94,8	42,6	0,16	0,20	509
Нальчик	0,318	53,3	78,6	54,7	77,7	46,7	0,32	0,32	506
Среднее	0,415	73,4	75,4	61,3	84,2	26,6	0,46	0,47	15747

**Успешность модельного прогноза облачности ≥ 6 окт с заблаговременностью 12 ч
в модели COSMO-RU07 за период с июля 2011 по апрель 2012 г.**

Аэродромы	Повтор. явлен.	Оправдываемость, %		Предупрежденность, %		Ложн. тревоги, %	PI	Н _Б	Число случ.
		налич.	отсут.	налич.	отсут.				
Архангельск	0,482	69,2	74,5	74,6	69,1	30,8	0,44	0,44	400
Салехард	0,137	21,2	93,4	75,0	55,7	78,8	0,31	0,15	526
Сыктывкар	0,422	55,7	80,2	82,4	52,1	44,3	0,34	0,32	524
Таллинн	0,559	88,2	68,3	67,7	88,5	11,8	0,56	0,54	531
С.Петербург	0,545	77,9	71,4	75,2	74,4	22,1	0,50	0,49	532
Рига	0,496	82,8	76,0	72,7	85,1	17,2	0,58	0,58	532
Вильнюс	0,598	87,1	64,1	67,9	85,0	12,9	0,53	0,50	532
Минск	0,570	85,7	68,3	70,7	84,4	14,3	0,55	0,53	523
Н.Новгород	0,485	81,3	81,3	79,8	82,8	18,7	0,63	0,63	530
Шереметьево	0,487	75,6	76,0	74,4	77,2	24,4	0,52	0,52	513
Внуково	0,530	83,1	74,4	74,6	82,9	16,9	0,58	0,57	521
Казань	0,434	80,6	84,7	79,9	85,3	19,4	0,65	0,65	516
Домодедово	0,478	78,4	78,3	75,5	81,0	21,6	0,56	0,57	513
Нижнекамск	0,329	65,5	87,2	76,0	80,4	34,5	0,56	0,54	456
Уфа	0,497	84,5	66,5	53,9	90,2	15,5	0,44	0,44	489
Самара	0,327	67,5	88,8	78,7	81,6	32,5	0,60	0,58	532
Одесса	0,368	77,6	74,5	45,9	92,3	22,4	0,38	0,42	532
Симферополь	0,375	72,6	74,4	49,2	88,8	27,4	0,38	0,41	530
Воронеж	0,458	76,0	74,5	66,8	82,1	24,0	0,49	0,49	506
Харьков	0,552	84,7	61,3	54,9	87,8	15,3	0,43	0,41	531
Днепропетровск	0,359	72,9	78,0	55,4	88,4	27,1	0,44	0,46	513
Донецк	0,455	86,0	73,7	60,7	91,7	14,0	0,52	0,54	532
Луганск	0,414	71,2	74,6	60,2	82,7	28,8	0,43	0,44	485
Ростов-на-Дону	0,283	58,4	86,4	67,8	81,0	41,6	0,49	0,46	527
Астрахань	0,269	61,8	83,6	53,1	87,9	38,2	0,41	0,43	531
Краснодар	0,376	80,5	74,6	47,5	93,1	19,5	0,41	0,44	532
Майкоп	0,262	57,5	83,7	52,5	86,2	42,5	0,39	0,40	531
Мин. Воды	0,443	82,0	72,8	57,6	89,9	18,0	0,48	0,49	517
Сочи	0,244	50,1	84,2	50,1	84,2	49,2	0,35	0,35	501
Нальчик	0,325	58,7	81,5	62,7	78,8	41,3	0,42	0,41	496
Среднее	0,419	72,7	77,1	66,1	82,1	27,3	0,48	0,49	15434

**Успешность модельного прогноза облачности ≥ 6 окт с заблаговременностью 24 ч
в модели COSMO-RU07 за период с июля 2011 по апрель 2012 г.**

Аэродромы	Повтор. явлен.	Оправдывае- мость, %		Предупрежден- ность, %		Ложн. тревоги, %	PI	Н _Б	Число случ.
		налич.	отсут.	налич.	отсут.				
Архангельск	0,485	68,5	74,6	75,8	67,1	31,5	0,43	0,43	408
Салехард	0,130	20,4	95,2	82,9	51,4	79,6	0,34	0,15	537
Сыктывкар	0,411	55,3	82,2	83,6	52,7	44,7	0,36	0,34	535
Таллинн	0,556	78,9	64,5	65,8	77,9	21,1	0,44	0,43	541
С.Петербург	0,547	76,3	69,5	73,7	72,4	23,7	0,46	0,46	543
Рига	0,501	80,0	71,1	66,2	83,4	20,0	0,50	0,50	543
Вильнюс	0,589	86,0	65,6	69,4	83,9	14,0	0,53	0,51	543
Минск	0,567	87,6	70,4	72,3	86,6	12,4	0,59	0,57	534
Н.Новгород	0,486	80,5	81,1	79,8	81,7	19,5	0,62	0,62	541
Шереметьево	0,484	77,0	76,7	74,3	79,3	23,0	0,54	0,54	523
Внуково	0,530	82,0	74,9	75,9	81,2	18,0	0,57	0,57	532
Казань	0,433	77,9	84,5	80,3	82,6	22,1	0,63	0,63	526
Домодедово	0,472	80,0	80,4	77,4	82,7	20,0	0,60	0,60	525
Нижнекамск	0,328	64,7	89,2	80,4	78,7	35,3	0,59	0,56	467
Уфа	0,494	85,1	67,6	55,5	90,5	14,9	0,46	0,46	500
Самара	0,331	66,2	90,3	82,8	79,1	33,8	0,62	0,58	542
Одесса	0,368	81,1	74,5	45,0	93,9	18,9	0,39	0,43	543
Симферополь	0,379	80,3	75,1	49,8	92,6	19,7	0,42	0,46	541
Воронеж	0,470	73,2	73,5	68,4	77,8	26,8	0,46	0,46	519
Харьков	0,548	86,1	63,6	58,2	88,6	13,9	0,47	0,45	541
Днепропетровск	0,359	69,3	77,7	56,1	86,1	30,7	0,42	0,44	526
Донецк	0,460	85,5	74,5	63,6	90,8	14,5	0,54	0,55	543
Луганск	0,411	67,9	75,5	63,2	79,1	32,1	0,42	0,43	496
Ростов-на-Дону	0,287	56,9	84,1	61,7	81,2	43,1	0,43	0,42	537
Астрахань	0,268	66,7	84,2	53,8	90,2	33,3	0,44	0,47	542
Краснодар	0,383	79,5	73,0	44,7	92,8	20,5	0,38	0,41	543
Майкоп	0,262	58,1	83,7	52,8	86,5	41,9	0,39	0,40	541
Мин. Воды	0,449	83,4	71,5	55,5	91,0	16,6	0,46	0,48	526
Сочи	0,245	51,2	84,0	50,4	84,5	48,7	0,35	0,35	511
Нальчик	0,323	59,6	80,9	60,4	80,5	40,4	0,41	0,41	507
Среднее	0,419	71,9	77,1	66,5	81,3	28,1	0,48	0,48	15758

ФИЗИКО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ФОНОВОГО ПРОГНОЗА УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ НА СРОК 6 ЛЕТ

Задача сверхдолгосрочного прогноза уровня Каспийского моря (УКМ) возникла, прежде всего, из требований практики [8]. Происходящие аномальные колебания уровня Каспийского моря, сопровождающиеся осушением или, наоборот, затоплением значительных прибрежных территорий, оказывают негативное влияние на многие аспекты экономики стран Каспийского региона. Наиболее ощутимыми для экологии и хозяйственной деятельности стран Каспийского региона являются многолетние изменения экстремумов величин и экстремумов продолжительностей периодов спада и подъема уровня Каспийского моря. Так, продолжительный подъем УКМ в период с 1978 по 1995 г. почти на 2,5 м привел к затоплению больших площадей прибрежной территории, нанеся огромный ущерб экономике прибрежных стран. Его разрушительные последствия были столь же драматичными, как и последствия продолжительного падения уровня моря в период с 1933 по 1977 г. (рис. 1).

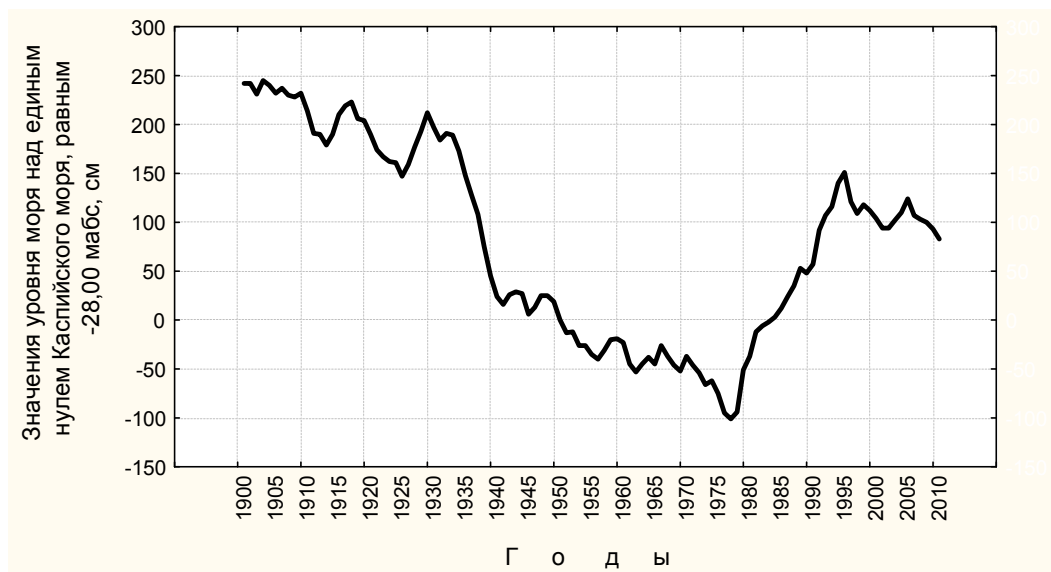


Рис. 1. Многолетний ход уровня Каспийского моря.

Одним из путей защиты населения и прибрежной инфраструктуры в периоды отступления и наступления на берега вод Каспия является долгосрочное планирование защитных мер с учетом реальной динамики водоема и его берегов и их периодическая корректировка. В этом плане долгосрочный прогноз УКМ может дать огромные экономические выгоды. Подсчитано, что каждый вложенный доллар в разработку прогноза

УКМ позволяет получить экономический эффект 5–10 долларов. Поэтому проблема сверхдолгосрочного прогноза уровня Каспийского моря была и остается весьма актуальной.

1. Метод исследования

В основу разработки физико-статистического метода сверхдолгосрочного прогноза УКМ была положена климатическая концепция, заключающаяся в том, что природа многолетних колебаний УКМ климатическая, т. е. колебания УКМ тесно связаны с компонентами климата, прежде всего с атмосферной циркуляцией над крупными регионами Северного полушария. Как показывают многочисленные исследования, влияние циркуляции атмосферы сказывается на основных процессах, формирующих уровенный режим Каспийского моря (сток рек, осадки, испарение). Также показано, что реакция УКМ на те или иные формы атмосферной циркуляции наступает не сразу, а с некоторым запаздыванием. Время запаздывания колеблется в довольно широком диапазоне и зависит от того, как долго будут сохраняться те или иные формы циркуляционных процессов над бассейном Каспия. Исходя из климатической природы многолетних колебаний УКМ, была сформулирована стратегия исследования, заключающаяся в поисках эффективных асинхронных связей между изменениями УКМ и атмосферными процессами, протекающими над крупными регионами Северного полушария. Впервые такой подход к долгосрочному прогнозу УКМ был удачно применен еще в середине прошлого столетия Н.А. Белинским и Г.П. Калинин [4, 5] и получил дальнейшее развитие в работах К.И. Смирновой и др. [10, 11]. Прогнозы УКМ по методике Белинского-Калинина-Смирновой (БКС) выпускались с 1951 года. Средняя оправдываемость прогнозов при допустимой погрешности 40 см составляла 77 %. Однако в силу эмпирической природы методика начиная с 1975 г. стала давать сбои, и в 1982 г. официальный выпуск прогнозов по этой методике был прекращен.

В последние годы в ФГБУ «Гидрометцентр России» были возобновлены исследования по долгосрочному прогнозированию УКМ. Накопленные к этому времени ряды наблюдений за атмосферными процессами и уровнем моря, новые знания о причинах многолетних колебаний УКМ и возросшие вычислительные возможности позволили по-новому подойти к решению проблемы долгосрочного прогноза УКМ [1–3]. Строить абсолютно точный прогноз УКМ на несколько лет вперед на современном уровне знаний – задача неразрешимая. Но такая цель и не ставилась. Речь идет о возможности получения прогностических оценок изменений УКМ с ошибкой, лежащей в допустимых интервалах, удовлетворяющих требованиям практики.

Разработка физико-статистического метода сверхдолгосрочного прогноза УКМ проводилось в два этапа.

На первом этапе формировались временные ряды предикторов, в качестве которых использовались количественные показатели атмосферной циркуляции, а в качестве предиктанта использовался временной ряд годовых приращений УКМ, после чего все исходные ряды проверялись на стационарность, нормальность, периодичность и наличие трендов.

На втором этапе на основе выявленных закономерностей в первом этапе строились различные варианты уравнений регрессии, из них выбирался наиболее оптимальный вариант и оценивалась его прогностическая эффективность.

Таким образом, основой физико-статистического метода прогнозных оценок изменений УКМ на срок до 6 лет служит уравнение регрессии, основанное на количественном учете предшествующих атмосферных процессов.

2. Исходные материалы

В качестве исходных материалов использовались данные наблюдений за уровнем моря по водомерному посту Махачкала за период с 1910 по 2009 г. (длина ряда 99 лет), который обеспечивает наиболее длинный ряд однородных наблюдений (без пропусков) на российском побережье Каспийского моря и практически повторяет многолетний ход среднего уровня моря ($R=0,90$).

Многолетний ход уровня Каспийского моря (рис. 1) имеет ярко выраженную нелинейность. Чтобы исключить или по крайней мере существенно уменьшить ее, исходный ряд приводился в соответствие с моделью стационарного случайного процесса с тем, чтобы к нему можно было применить аппарат линейной математической статистики. Для этого в качестве показателя изменчивости УКМ брались не сами значения уровня, а их приращения в смежные годы, так называемые первые разности ΔH , вычисляемые по формуле

$$\Delta H = H_i - H_{i-1}, \quad (1)$$

где H_i – уровень моря текущего года; H_{i-1} – уровень моря предшествующего года. После выполнения данного преобразования исходный ряд приобретает характер случайного процесса (рис. 2).

При разработке метода прогноза УКМ в качестве предикторов использовались коэффициенты разложения в ряды по естественным составляющим (ЕС) полей аномалий атмосферного давления на уровне моря, рассчитанные за период с 1910 по 2009 г. Способ нахождения ЕС описан в [6]. Основное преимущество такого подхода заключается в максимальной скорости сходимости ряда разложения и возможности физической интерпретации результатов разложения. Он позволяет представить основную информацию

об исходных полях компактно первыми несколькими коэффициентами ряда разложения и производить целенаправленный отбор наиболее информативных компонентов.

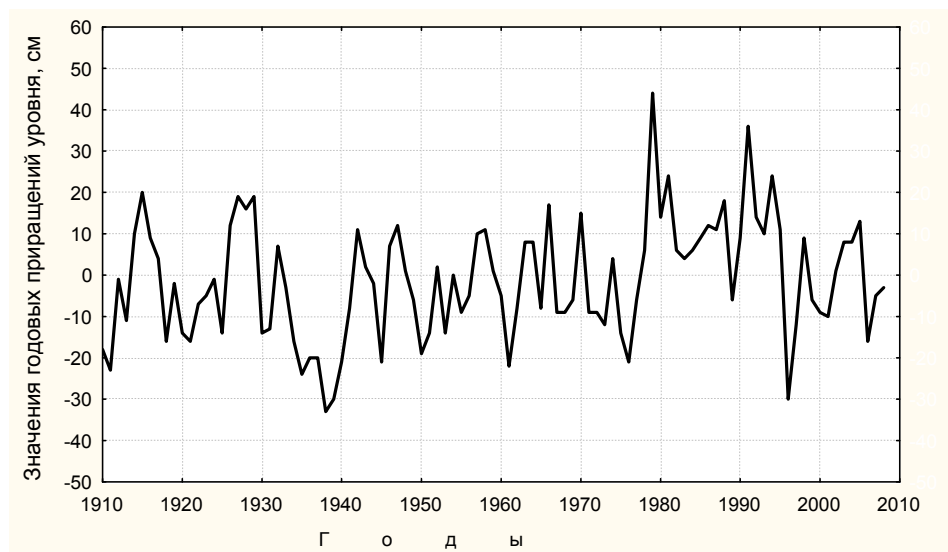


Рис. 2. График многолетнего хода годовых приращений УКМ по водомерному посту Махачкала.

Для расчета коэффициентов разложения по ЕС все Северное полушарие было разбито на пять больших секторов, из них для разработки метода было отобрано три наиболее информативных сектора: I сектор – Атлантический океан, II сектор – Европа, III сектор – Азия (рис. 3), которые характеризуют атмосферные процессы, протекающие над Северной Атлантикой, Европой и Азией. Для каждого сектора была определена сеть равномерно расположенных точек, в которых снимались среднемесячные значения аномалий приземного атмосферного давления, по данным которых были рассчитаны естественные составляющие и коэффициенты разложения [6, 7].

Кроме того, рассматривался VI сектор, представляющий комбинацию I и II секторов и охватывающий атлантико-евразийскую территорию. Для него коэффициенты разложения брались как средние из значений коэффициентов разложения I и II секторов.

Следует отметить, что все отобранные сектора имеют характерные природные различия, обусловленные региональной спецификой направления воздушных потоков и их интенсивностью, связанные с общей циркуляцией атмосферы над Северным полушарием. Характерное распределение регионального преобладания приземных аномалий давления сведено таким образом к нескольким барическим шаблонам, которые используются при анализе циркуляции в пределах каждого сектора.

В изменчивости величин и знаков коэффициентов разложения по секторам отмечаются определенные закономерности, которые были использованы при отборе предикторов.

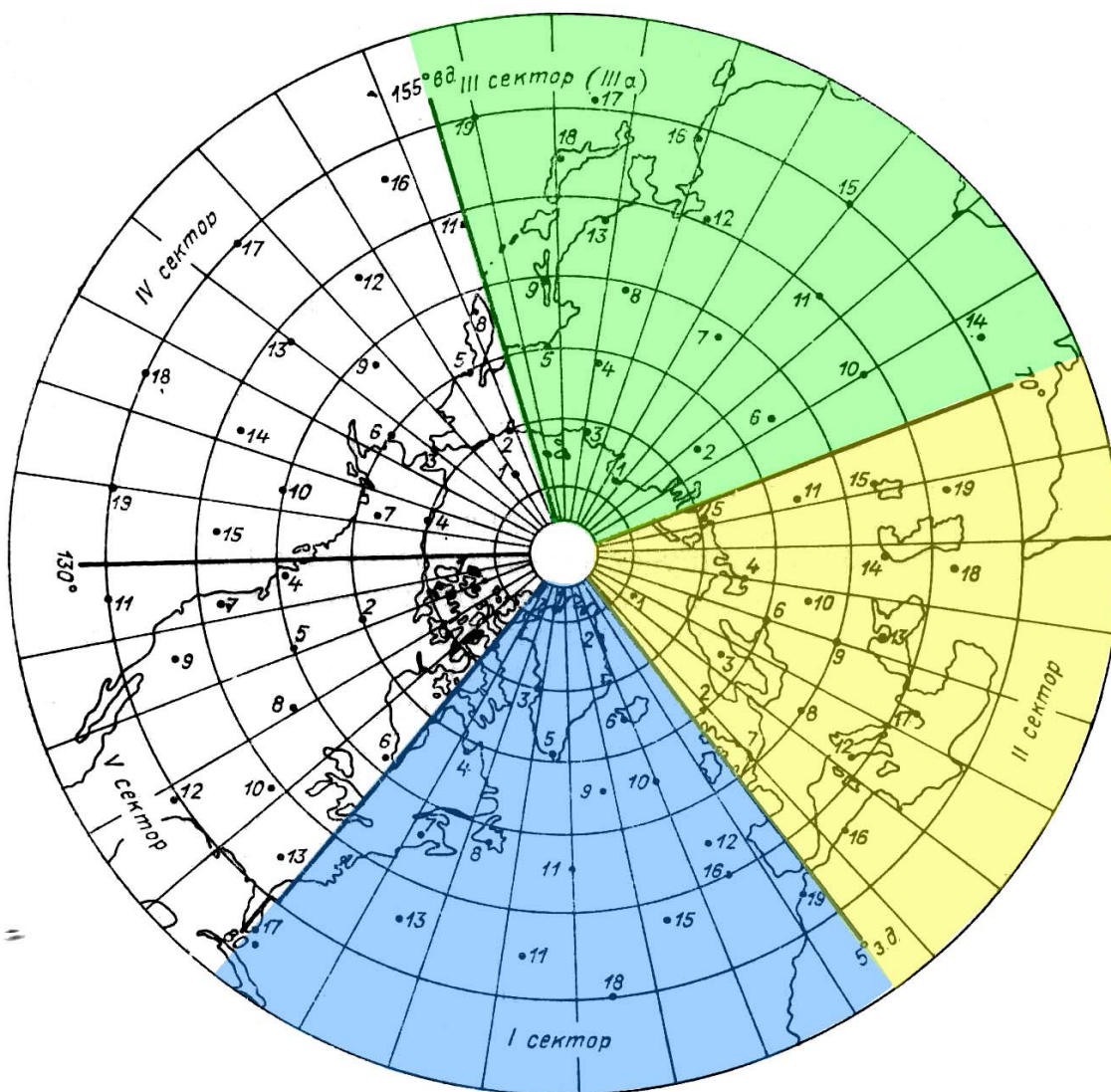


Рис. 3. Сектора для расчета коэффициентов разложения.

3. Обработка временных рядов

Разработка прогноза УКМ на большие сроки неизбежно требует соответствующего увеличения масштабов осреднения исходных рядов по времени, чтобы выявить наиболее характерные особенности (аномалии) процессов и их тенденции. Для выявления крупномасштабных аномалий была выполнена процедура сглаживания исходных рядов. Для этого из исходных рядов с помощью процедуры скользящего сглаживания были отфильтрованы низкочастотная (вековой ход) и высокочастотная части спектра (с периодами менее 5 лет). После выполнения процедуры фильтрации исходных рядов стали четко проявляться основные особенности в многолетнем ходе годовых приращений УКМ (рис. 4) и коэффициентов разложения по естественным составляющим (рис. 5).

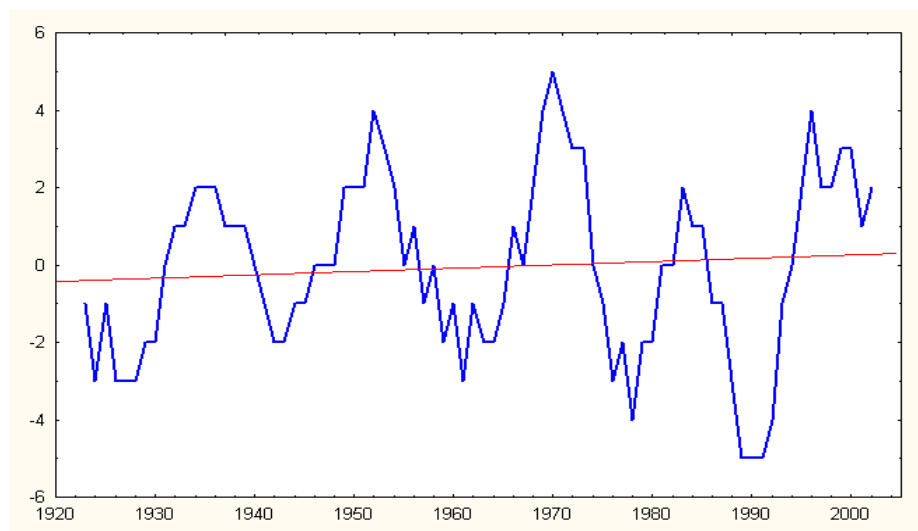


Рис. 4. Кривая многолетнего хода с трендом годовых приращений УКМ после исключения векового хода и высокочастотных составляющих.

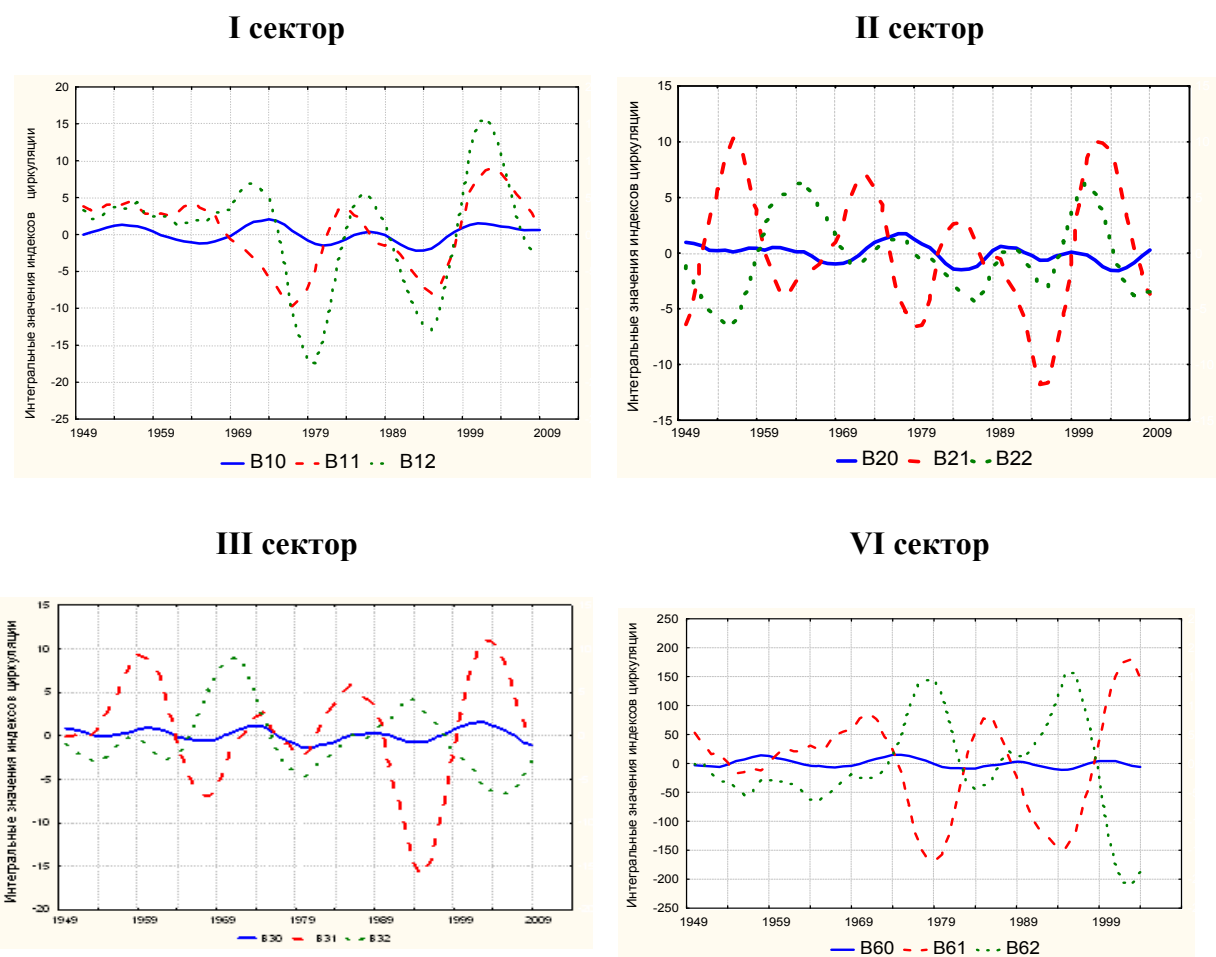


Рис. 5. Сглаженные кривые многолетнего хода коэффициентов разложения для четырех секторов.

На сглаженных кривых наиболее четко проявляются крупные аномалии как в ходе годовых приращений УКМ (ΔH), так и в ходе коэффициентов разложения (B_i). При этом

оказалось, что многолетний ход годовых приращений уровня моря в основных чертах повторяет ход показателей атмосферной циркуляции, но с определенными сдвигами относительно друг друга.

Наиболее информативной статистической характеристикой квазистационарных процессов является автокорреляционная функция. Корреляционный анализ рассматриваемых рядов показал, что наиболее характерной длительностью ритмов (но не периодов) являются квазикратные интервалы 18–20, 10–12 и 5–6 лет. Указанные ритмы обнаруживаются как в сглаженных рядах показателей атмосферной циркуляции, так и в сглаженных рядах УКМ. Детальный анализ изменчивости, концентрирующейся в диапазонах низких частот, позволяет сформировать стратегию сверхдолгосрочного прогноза УКМ. В качестве примера на рис. 6 представлена автокорреляционная функция сглаженных значений годовых приращений УКМ. Для прогнозирования УКМ на 6 лет подбирался свой оптимальный ритм, равный 6 годам.

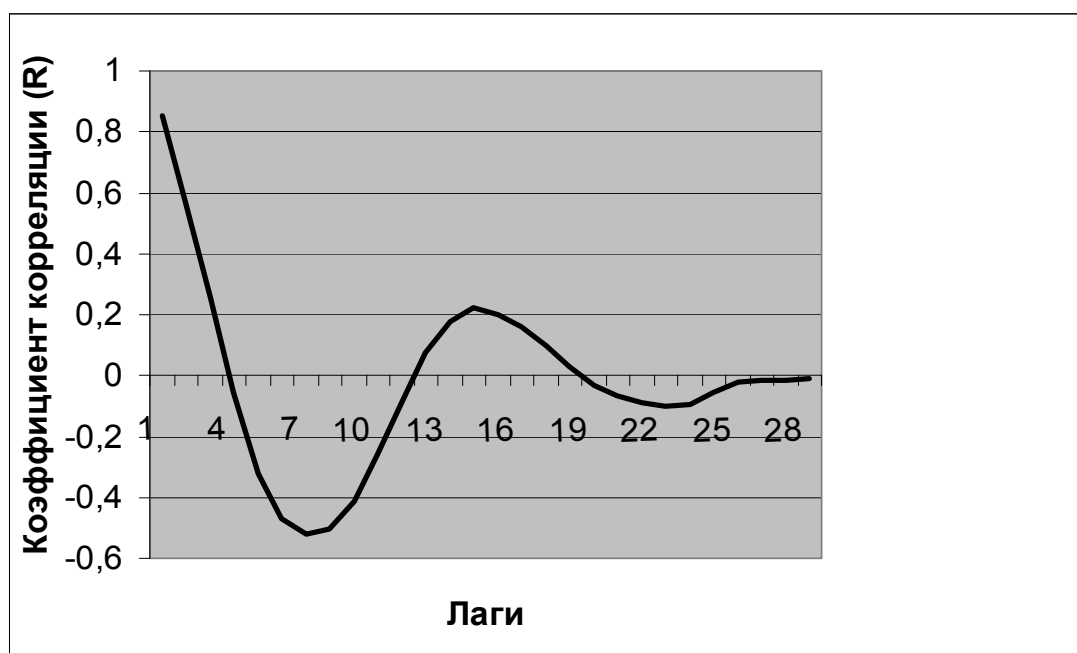


Рис. 6. Автокорреляционная функция сглаженных значений годовых приращений УКМ.

Анализ трендов сглаженных кривых многолетнего хода рассматриваемых величин показывает, что ни одна из величин не имеет значимого тренда. О знаке и величине тренда можно говорить только в статистическом смысле. Тренды выражены слабо, для корректности они исключались. Для этого по уравнениям регрессии определялись значения тренда на каждый год, которые затем вычитались из исходного ряда.

Проверка на нормальность выполнялась путем расчета гистограмм эмпирического распределения с наложенной на них теоретической кривой нормального распределения. На

рис. 7 показана гистограмма сглаженных значений годовых приращений УКМ с наложенной нормальной плотностью распределения.

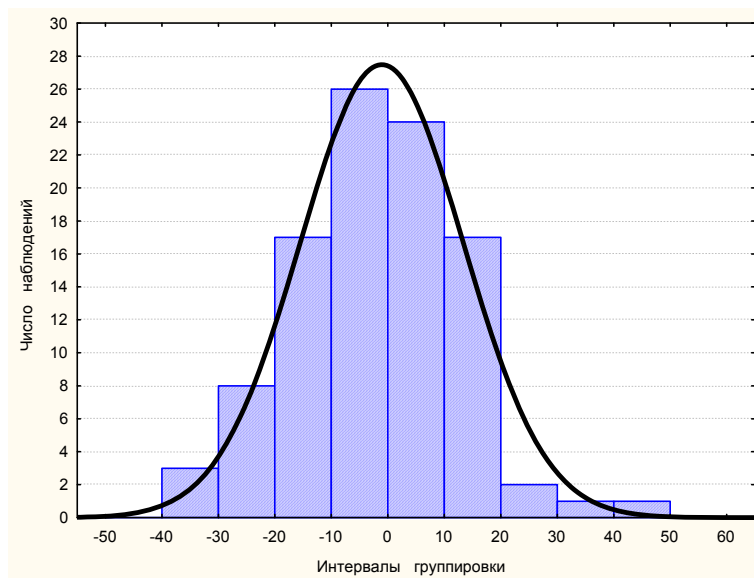


Рис. 7. Гистограмма сглаженных значений годовых приращений УКМ с наложенной нормальной плотностью распределения.

Из рисунка видно, что эмпирическое распределение достаточно хорошо соответствует теоретической кривой нормального распределения.

4. Построение прогностических уравнений регрессии и их анализ

Отбор наиболее значимых уравнений регрессии осуществлялся по схеме

$$(\Delta \Sigma H)_{t+\Delta t} = b_0 + a_i (\Sigma B_i)_t + d, \quad (2)$$

где $(\Delta \Sigma H)_{t+\Delta t}$ – накопленная сумма годовых приращений УКМ на момент прогноза; $(\Sigma B_i)_t$ – накопленная сумма коэффициентов разложения за предшествующие 6 лет от момента составления прогноза; b_0 – свободный член; a_i – коэффициенты регрессии; d – ошибка прогноза (белый шум).

Ряды предикторов и предиктанта формировались путем скользящего суммирования рассматриваемых величин по интервалам заблаговременности, т.е. по 6-летиям. Иными словами, если исходные накопленные суммы коэффициентов разложения брались за годы 1991–1996, 1992–1997 и т.д., то среднегодовые приращения УКМ рассчитывались за годы 1997–2002, 1998–2003 и т.д.

Использованный прием скользящего оценивания исключает необходимость обязательной проверки прогностического уравнения на независимом ряде, так как расчет по прогностическому уравнению в режиме скользящего оценивания позволяет сохранить его

статистическую устойчивость во времени автоматически. Такой прием особенно эффективен, когда приходится иметь дело с достаточно ограниченными объемами выборок.

Для учета информативности тех или иных секторов в экспертном порядке было реализовано три регрессионных модели априорной оценки прогноза УКМ на 5 и 6 лет, оценивающих вклад отдельных секторов (или их совокупности) в общую дисперсию изменчивости УКМ.

В первой модели (М1) в качестве предикторов учитывались коэффициенты s разложения I и II секторов за период с 1910 по 2009 год, во второй (М2) – коэффициенты разложения III и VI секторов за период с 1931 по 2009 год и в третьей модели (М3) – коэффициенты разложения I, II и III секторов за период с 1931 по 2009 год. В качестве предиктанта во всех моделях использовался ряд накопленных по 6-летиям сумм годовых приращений УКМ. Поиск корреляционных связей осуществлялся методом пошаговой множественной линейной регрессии. Его преимущество заключается в том, что он позволяет одновременно учесть несколько предикторов и расставить их в порядке приоритетности.

5. Проверка методики

Оценка значимости и целесообразности практического применения прогностических уравнений осуществлялась на основе следующих статистических характеристик: общего коэффициента корреляции R , среднеквадратичной ошибки прогноза (стандарт) S , критерия Фишера F , среднеквадратичного отклонения прогноза от нормы σ . Практическая применимость (эффективность) метода оценивалась по отношению S/σ (табл. 1). В таблице Δt – заблаговременность прогноза.

Таблица 1

Статистические характеристики уравнений регрессии по трем моделям

Модель	Δt , лет	R	S	F	σ	S/σ
М1	5	0,954	11,4	73	38,4	0,297
	6	0,979	11,4	154	34,2	0,333
М2	5	0,908	10,7	34	37,4	0,286
	6	0,988	8,6	268	28,2	0,299
М3	5	0,973	6,9	109	26,3	0,262
	6	0,982	5,6	155	26,3	0,213

Анализ результатов расчетов показал, что параметры уравнений регрессии в каждой из моделей отличаются друг от друга в зависимости от количества предикторов, длины ряда и заблаговременности прогноза. Следует отметить, что все модели дают удовлетворительные результаты и отвечают требованиям [9]. Однако модель М3, которая учитывает восточные атмосферные процессы, по точности превосходит первые две для заблаговременностей 5 и 6

лет. Это подтверждает тот факт, что на уровенный режим Каспия оказывают влияние атмосферные процессы не только с запада, но и с востока. На рис. 8 показано, что именно учет атмосферных процессов с востока делает модель М3 (верхняя пунктирная кривая) более приоритетной. Она характеризуется более высокими коэффициентами корреляции и большей временной устойчивостью, чем модели М1 и М2.

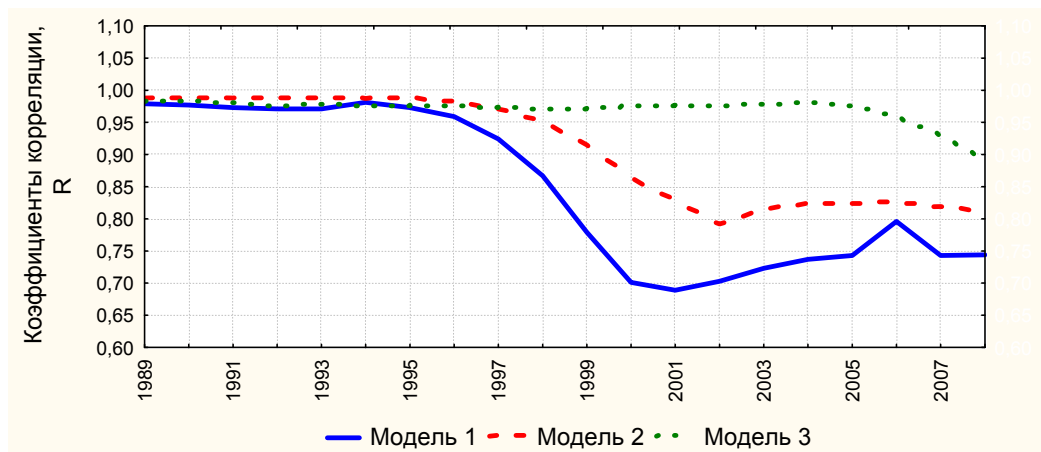


Рис. 8. Временной ход коэффициентов корреляции по трем моделям.

Кроме того, анализ результатов расчетов показал, что наиболее устойчивые связи получаются для заблаговременности 6 лет. Это хорошо видно на рис. 9, на котором показан ход коэффициентов корреляции уравнений регрессии, построенных по модели М3 для заблаговременностей 5 и 6 лет.

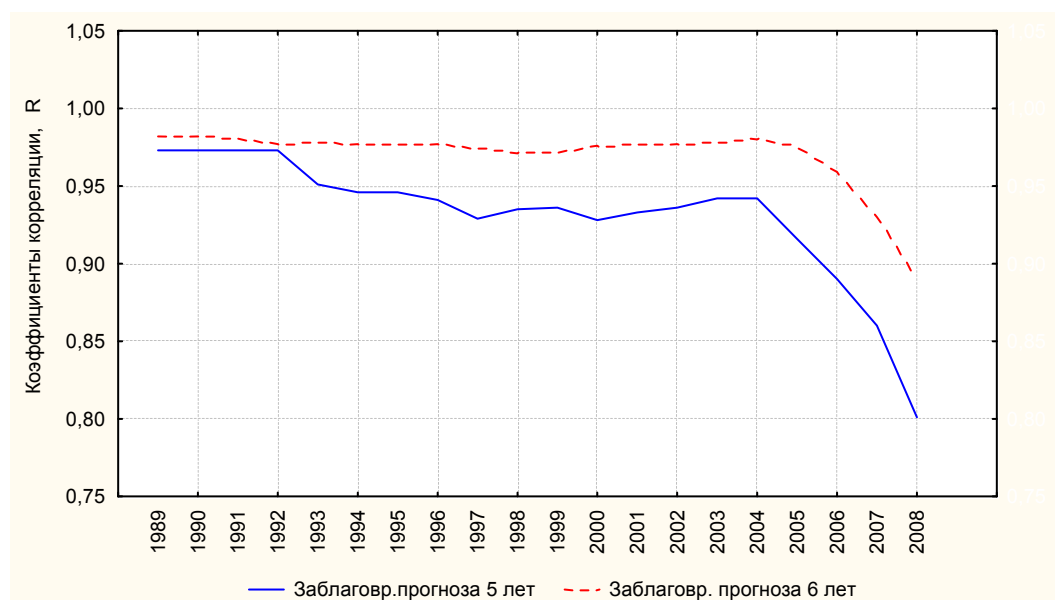


Рис. 9. Временной ход коэффициентов корреляции уравнений регрессии, построенных по модели М3 для заблаговременностей 5 и 6 лет.

На основании этих результатов за основу была принята модель М3, по которой выполнялись проверочные прогнозы изменений уровня моря на срок до 6 лет.

Конкретное выражение уравнения регрессии для модели МЗ имеет вид:

$$y = -1,1349 - 1,4B_0^{\text{III}} + 0,601B_1^{\text{III}} + 0,316B_2^{\text{III}} + 0,718B_0^{\text{II}} + 0,098B_2^{\text{II}} + 0,066B_0^{\text{I}} + 0,093B_1^{\text{I}}. \quad (3)$$

Здесь $y = \sum_{i=1}^n (\Delta H)_{t+\Delta t}$ – накопленные по 6-летиям суммы годовых приращений УКМ; В – коэффициенты разложения. Верхний индекс при В обозначает номер сектора, а нижний – порядковый номер коэффициента разложения. Коэффициент детерминации уравнения регрессии $R^2=0,981$, стандартная ошибка $S = 4,037$. Уравнение (3) учитывает семь наиболее информативных коэффициентов разложения, относящихся к трем секторам (МЗ). Для III сектора наиболее информативными коэффициентами являются B_0 , B_1 и B_2 , для II сектора – B_0 и B_2 , и для I сектора – B_0 и B_1 . При этом следует иметь в виду, что эти коэффициенты отражают элементарные поля, соответствующие ЕС, кроме коэффициента B_0 , который представляет значение аномалии давления, осредненное по всем точкам данного сектора. Коэффициент B_1 отображает зональные потоки воздушных масс (при знаке «+» западно-восточный перенос, а при знаке «-» перенос с востока на запад); коэффициент B_2 отражает меридиональные потоки воздушных масс (при знаке «+» перенос воздушных масс с севера на юг, а при знаке «-» – наоборот). Таким образом, характерное распределение регионального преобладания приземных полей аномалий атмосферного давления сведено к нескольким барическим шаблонам, которые используются при анализе циркуляции в пределах каждого сектора.

На рис. 10 представлен график сопоставления фактических и вычисленных по уравнению (3) накопленных по 6-летиям сумм годовых приращений УКМ.

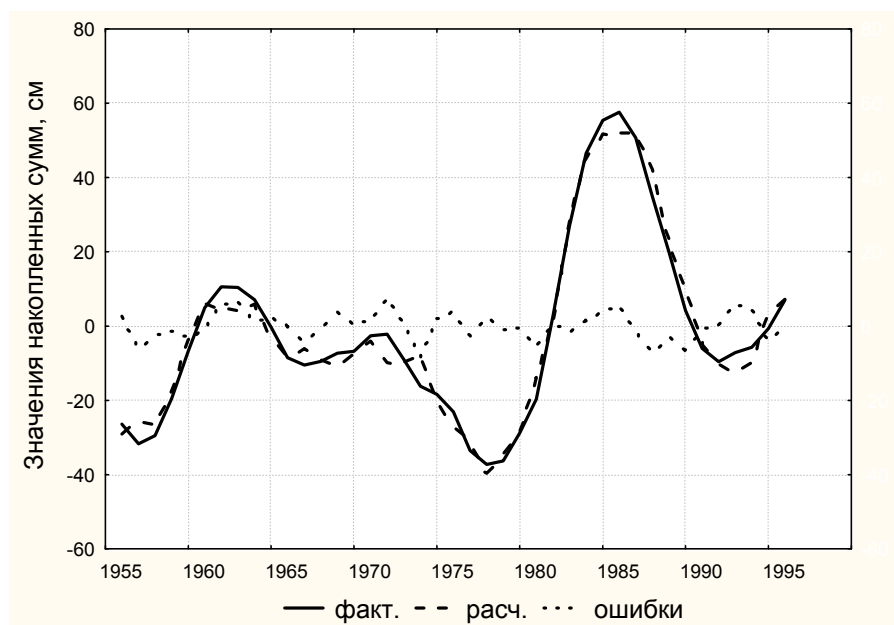


Рис. 10. График хода фактических и вычисленных по уравнению (3) накопленных по 6-летиям сумм годовых приращений УКМ и ход ошибок расчета.

Таким образом, суть усовершенствованной методики состоит в расчете по линейным уравнениям регрессии для значимых корреляционных связей прогностических значений накопленных сумм годовых приращений УКМ на момент прогноза по исходным данным об атмосферной циркуляции, взятым за 6 лет до момента составления прогноза.

Как уже указывалось выше, прогноз осуществлялся в режиме скользящего оценивания параметров уравнения регрессии, представляющего аналог адаптивного регрессионного метода. Он исключает необходимость обязательной проверки прогностического уравнения на независимом ряде и позволяет сохранить его статистическую устойчивость во времени автоматически. Такой подход особенно эффективен, когда приходится иметь дело с относительно ограниченными выборками.

Для проверки качества разработанной методики было составлено 13 проверочных прогнозов с 1997 по 2009 год. Следует отметить, что оценочный период отличался значительными аномалиями в ходе уровня моря. При этом прогностические значения изменения уровня сравнивались с фактическими изменениями уровня моря на момент прогноза. Результаты сопоставления накопленных по 6-летиям сумм годовых приращений УКМ по данным фактических наблюдений и накопленных по 6-летиям прогностических сумм годовых приращений УКМ показаны в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты сопоставления фактических и прогностических значений изменений УКМ
за 6 лет (допустимая погрешность $\sigma = 26$ см)**

Годы	$\Sigma \Delta H_{\text{ф}}$	$\Sigma \Delta H_{\text{пр}}$	$\Delta_{\text{метод}}$	$\Sigma \Delta H_{\text{клим}}$	$\Delta_{\text{клим}}$	Оправд. методич. прогнозов	Оправд. климатич. прогнозов
1991-1997	17	-7	24	2	15	+	+
1992-1998	11	-11	22	-2	13	+	+
1993-1999	-4	-15	11	-2	-2	+	+
1994-2000	-36	-17	-19	-2	-34	+	-
1995-2001	-57	-15	-42	-2	-55	-	-
1996-2002	-27	-10	-17	-1	-26	+	-
1997-2003	-7	-9	2	0	-7	+	+
1998-2004	-8	-5	-3	0	-8	+	+
1999-2005	12	1	11	0	12	+	+
2000-2006	3	7	-4	-1	4	+	+
2001-2007	9	9	0	-2	11	+	+
2002-2008	6	10	-4	-3	9	+	+
2003-2009	-9	7	-16	-4	-5	+	+

Средняя оправдываемость методических прогнозов составила 85 %, а климатических – 77 %, т.е. эффективность методических прогнозов оказалась на 8% выше климатических и на 8% выше прогнозов, составленных по методике БКС, но при допустимой ошибке не 40, а

26 см. Этот результат дает основание для применения разработанного метода в оперативную практику.

От прогноза накопленных по 6-летиям сумм годовых приращений уровня легко перейти непосредственно к прогнозу уровня моря, выраженного относительно единого нуля Каспийского моря, равного $-28,00$ м абс, путем прибавления к уровню исходного года (H_0) суммы годовых приращений уровня по формуле

$$H = H_0 + \Sigma \Delta H, \quad (4)$$

где H_0 – исходный средний годовой уровень моря в момент составления прогноза, $\Sigma \Delta H$ – спрогнозированная по уравнению регрессии накопленная за 6 лет сумма годовых приращений УКМ. Согласно формуле (4), к значению уровня моря, взятому в год составления прогноза, прибавляется величина изменения уровня в течение последующих 6 лет, рассчитанная по уравнению регрессии. В табл. 3 представлены сопоставления наблюдаемых и рассчитанных по формуле (4) значений уровня относительно единого нуля Каспийского моря, равного $-28,00$ м абс.

Таблица 3

Результаты сопоставления фактических (H_f) и прогностических значений уровня моря ($H_{пр}$) (допустимая погрешность $\sigma = 26$ см)

Год составления прогноза	Год, на который дан прогноз	H_f	$H_{пр}$	Ошибка	Оправды-ваемость
1991	1997	117	85	-32	—
1992	1998	112	96	-16	+
1993	1999	110	101	-9	+
1994	2000	107	123	16	+
1995	2001	98	126	28	—
1996	2002	95	111	16	+
1997	2003	102	100	-2	+
1998	2004	111	113	2	+
1999	2005	123	113	-10	+
2000	2006	107	111	4	+
2001	2007	113	103	-10	+
2002	2008	99	104	5	+
2003	2009	93	109	16	+

Средняя оправдываемость методических прогнозов составила 85 %.

На рис. 11 представлен многолетний ход фактических значений УКМ с 1990 по 2009 г. (сплошная линия) и прогноз фонового изменения УКМ до 2016 г. (пунктирная линия), составленный в 2010 г. и помещенный в гидрометеорологический бюллетень ФГБУ «Гидрометцентр России».

В соответствии с прогнозом на 6 лет (до 2016 г.) ожидается понижение среднего уровня моря по отношению к среднему уровню 2010 г. на 11 см. Наиболее вероятное значение

среднего уровня моря в 2016 г. составит $-27,28$ м абс или 72 см относительно единого нуля Каспийского моря, равного $-28,00$ м абс.

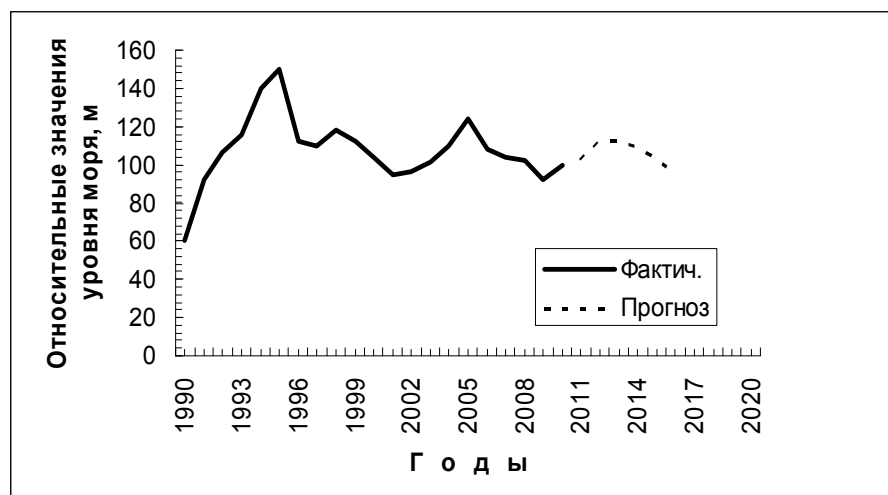


Рис. 11. Многолетний ход фактических значений УКМ с 1990 по 2009 г. и прогноз УКМ до 2016 г.

На заседании ЦМКП Росгидромета от 2 марта 2011 г. принято решение:

Рекомендовать ФГБУ «Гидрометцентр России»:

- внедрить метод фонового прогноза колебаний уровня Каспийского моря на 6 лет в оперативную практику;
- помещать в гидрометеорологический бюллетень, выпускаемый ежегодно в начале мая, прогноз изменения уровня Каспийского моря на ближайшее шестилетие (или его уточнение с прогнозом на один год) с использованием вероятностной формы для характеристики существующей неопределенности.

Список литературы

1. Абузяров З.К., Нестеров Е.С. Некоторые особенности пространственно-временной изменчивости уровня Каспийского моря // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 345. – С. 5–23.
2. Абузяров З.К. О прогностической оценке фоновых изменений уровня Каспийского моря на срок до 12 лет // Труды Гидрометцентра России. – 2004. – Вып. 339. – С. 3–21.
3. Абузяров З.К. Технология прогноза тенденций изменения УКМ на перспективу 6 и 18 лет // В сб. «Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна». – СПб.: Гидрометеиздат, 2003. – С. 351–363.
4. Белинский Н.А., Калинин Г.П. О прогнозах колебаний уровня Каспийского моря // Труды НИУ ГУГМС. – 1946. – Сер. IV. – Вып. 37. – 36 с.

5. *Белинский Н.А.* Использование некоторых особенностей атмосферных процессов для долгосрочных прогнозов. – Л.: Гидрометеиздат, 1957. – 203 с.
6. *Глаголева М.Г.* Методическая записка по разложению в ряды по естественным составляющим полей аномалий атмосферного давления над Северным полушарием. – М.: Гидрометцентр СССР. – 1978. – 22 с.
7. *Глаголева М.Г.* Таблицы коэффициентов разложения в ряды по естественным составляющим полей аномалий среднего месячного давления над Северным полушарием. – М.: Гидрометцентр СССР. – 1977. – 165 с.
8. *Косарев А.Н., Никонова Р.Е.* Современные колебания уровня Каспийского моря: причины, последствия, тенденции // Вестник Каспия. – 2006. – № 4 (60). – С. 40–59.
9. РД 52.27.723. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Ч. III. Служба морских гидрометеорологических прогнозов. – М.: ТРИАДА ЛТД, 2011. – 196 с.
10. *Смирнова К.И.* Водный баланс и долгосрочный прогноз уровня Каспийского мор // Труды Гидрометцентра СССР. – 1972. – Вып. 94. – 122 с.
11. *Шереметевская О.И., Лунякова Л.Г.* Опыт обеспечения народного хозяйства долгосрочными прогнозами уровня Каспийского моря // Труды Гидпрометцентра СССР. – 1985. – Вып. 270. – С. 36–42.

МЕТОД ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ НА БЕЛОМ И АЗОВСКОМ МОРЯХ, ОСНОВАННЫЙ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В соответствии с Планом испытания и внедрения новых и усовершенствованных методов (технологий) гидрометеорологических прогнозов на 2011 год в ФГБУ «Гидрометцентр России» были проведены оперативные испытания нового метода долгосрочного прогноза ледовых условий. В качестве зависимых рядов для получения расчетных уравнений использовались наиболее полные ряды наблюдений за ледовыми характеристиками с начала организации наблюдений (различного для разных ледовых характеристик: например, ледовые фазы в Архангельске – с 1895 г., а ледовитость Белого и Азовского морей – с 1950 г.) до ледового сезона 2004-2005 гг. В качестве независимого ряда, принятого к испытаниям, использовались данные шести ледовых сезонов с 2005–2006 по 2010–2011 гг.

Введение

В Отделе морских гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» в течение многих лет составляется долгосрочный прогноз ледовых условий на российских морях на предстоящую зиму. Прогнозируется ряд характеристик по портам неарктических морей (в том числе Белого и Азовского морей с заблаговременностью от двух до восьми месяцев): сумма градусодней мороза (СГДМ), первое появление льда (ПП), максимальная за ледовый сезон средняя месячная ледовитость моря (МЛ), максимальная за ледовый сезон толщина припайного льда (МТ), дата окончательного очищения моря ото льда (ОО), продолжительность ледового периода (ЛП).

Долгосрочный прогноз ледовых характеристик ежегодно в начале октября публикуется в бюллетене «Долгосрочный прогноз ледовых условий на неарктических морях на предстоящий ледовый сезон», который рассылается пользователям.

Основными в области долгосрочных ледовых прогнозов в настоящее время являются физико-статистические методы, опирающиеся на предположение о преемственности и цикличности процессов, происходящих в природе [1]. Несмотря на то, что все неарктические моря находятся в разных физико-географических районах, в их ледовом

режиме много общего: на всех морях наблюдается большая ледовая инерция; знаку аномалии ледовитости на одном море, как правило, соответствует такая же по знаку аномалия на других морях данного региона. Существует значимая корреляция (коэффициент корреляции $r = 0,6-0,8$) между ледовитостью и положением кромки льда, ледовитостью и толщиной льда. Ледовые процессы на всех морях связаны со спецификой макроциркуляционных атмосферных процессов, которые в свою очередь зависят от состояния центров действия атмосферы в месяцы, предшествующие ледовому сезону [4, 6].

Это делает возможным осуществление единого подхода к разработке метода долгосрочного ледового прогноза для всех неарктических морей. Попытка такого единого подхода была предпринята в Гидрометцентре СССР А.И. Каракашем в 1970-х гг. [2]. В 2008–2010 гг. была осуществлена проверка данного метода на независимом 25-летнем ряде наблюдений (1983–2007 гг.), которая не дала положительного результата. Это свидетельствует о том, что статистические связи не являются устойчивыми и нуждаются в постоянном обновлении, что объясняется прежде всего сменой макроциркуляционных эпох [3, 4]. В настоящее время происходят климатические изменения, которые обуславливают внесение определенных корректив в зависимости, полученные на основе эмпирико-статистических исследований в XX в. с использованием коротких рядов данных (20–30 лет). Такие ряды не дают возможности привлечения большого числа предикторов. Сложность изучаемых природных процессов заключается в том, что использование трех-четырех предикторов может обеспечить устойчивость связи только на коротком отрезке времени. С другой стороны, с неограниченным увеличением числа аргументов коэффициент корреляции между рядами фактических и расчетных величин может увеличиваться с одновременным уменьшением его достоверности [3]. Таким образом, существует острая необходимость постоянного совершенствования таких методик долгосрочного прогноза ледовых условий в европейских морях России.

1. Используемые данные

Информационной основой испытываемого нового метода долгосрочного прогноза ледовых условий на неарктических морях являются данные электронного архива метеорологической и ледовой информации, созданного в лаборатории ледовых прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» в последние годы.

Архив включает:

– данные наблюдений за температурой воздуха у поверхности Земли и приземным давлением на морских гидрометеорологических станциях неарктических морей;

– данные наблюдений за температурой воздуха у поверхности Земли и приземным давлением в пунктах, расположенных в районах центров действия атмосферы (ЦДА): сибирского максимума (Иркутск), исландского минимума (Рейкьявик) и азорского максимума (Понта-Делгада);

– таблицы дат наступления ледовых фаз, продолжительности ледовых периодов и толщин припайного льда, составленные по данным наблюдений морских ГМС;

– таблицы ледовитости неарктических морей.

Длина рядов данных о параметрах центров действия атмосферы составляет 110 лет. Ряды температуры воздуха у поверхности Земли на станциях «Архангельск» и «Кандалакша» (Белое море), «Ростов-на-Дону» (Азовское море) также охватывают 110 лет. Длина рядов наблюдений для ледовитости морей составила 60 лет, для толщины льда в портах – от 70 до 90 лет, для ледовых фаз и ледового периода в районах портов – от 70 до 110 лет.

2. Технология долгосрочного прогноза

В основу методики прогноза заложено предположение о том, что на будущую суровость зимы и значения ледовых характеристик в любом порту европейской части России влияют состояние, интенсивность и взаимодействие крупных термобарических атмосферных структур; положение пункта прогноза относительно центров этих структур; наличие накладывающихся друг на друга циклов, определяемых внешним (космическим) воздействием.

Технология долгосрочного прогноза представляет собой ансамблевый метод, включающий три компонента для расчета ледовых параметров [5, 6, 9, 10]:

1. Расчет по уравнениям множественной корреляции на основе использования поля приземной температуры воздуха над евроатлантическим сектором.

2. Расчет по уравнениям множественной корреляции на основе использования характеристик поля приземного давления над евроатлантическим сектором.

3. Разложение кривых хода межгодовой изменчивости ледовых параметров на гармонические составляющие с последующей экстраполяцией их сумм на предстоящий ледовый сезон.

В окончательном прогнозе ледовых характеристик учитывается вклад каждого из трех компонентов. При этом величина этого вклада в общий результат пропорциональна обеспеченности расчета в рамках каждого компонента.

При разработке методики прогноза исследовалась связь характеристик ледового режима неарктических морей с параметрами атмосферных процессов:

– среднемесячными значениями приземной температуры воздуха, характеризующими сибирскую, причерноморскую, североатлантическую и беломорскую воздушные массы, и разностями этой температуры на фиксированных створах ΔT_1 и ΔT_2 (см. табл. 1);

– среднемесячными значениями приземного давления в центрах действия атмосферы и разностями этих значений на фиксированных створах ΔP_1 и ΔP_2 (см. табл. 2).

Корреляционный анализ осуществлялся по данным девяти месяцев, предшествующих ледовому сезону (с января по сентябрь включительно) [7]. Ограничение набора предикторов данными за сентябрь было определено тем, что результаты прогноза предоставляются потребителям ледовой информации уже в начале октября. По результатам анализа были выбраны наиболее значимые предикторы, которые и вошли в окончательные уравнения. Отфильтрованные предикторы обладают «метеорологической» памятью, наличие которой подтверждается достаточно значимой корреляцией.

Для морей европейской части России выбран единый набор предикторов (42 характеристики поля температуры и 39 характеристик поля давления). Уравнения для всех портов имеют аналогичный вид, отличаясь только весовыми коэффициентами. Число весовых коэффициентов, отличных от нуля, в каждом уравнении не превышает 20 % ряда рассчитываемой ледовой характеристики. Термическое и барическое воздействия включены в отдельные компоненты методики с целью облегчения выявления их системного влияния на будущую специфику ледовых процессов.

Если обозначить предикторы $x_1, x_2, \dots, x_n$, то линейное корреляционное уравнение может быть записано:

$$y = A_i(B_1 x_1 + B_2 x_2 + \dots + B_n x_n) + C_i, \quad (1)$$

где $B_1, B_2, \dots, B_n$ – весовые коэффициенты; A_i и C_i – коэффициенты в линейном уравнении для i -го элемента ледового режима (сумма градусодней мороза, дата начала ледообразования, максимальная за ледовый сезон ледовитость моря, максимальная за ледовый сезон толщина льда, дата очищения моря ото льда).

В табл. 1 в качестве примера приведены весовые коэффициенты (B) и предикторы (x) для расчета СГДМ, определяющей суровость будущей зимы, по полю приземной температуры воздуха для трех портов.

В табл. 2 аналогично приведены весовые коэффициенты в уравнениях расчета СГДМ по полю приземного давления для тех же портов.

Таблица 1

Предикторы (х), характеризующие поле приземной температуры, и весовые коэффициенты (В) в уравнениях расчета СГДМ для портов Белого и Азовского морей

Предикторы	Весовые коэффициенты		
	Кандалакша	Архангельск	Ростов-на-Дону
Номер года	0	0	–0,075
Причерноморская воздушная масса			
$T_P(I)$	0	0	0,25
$T_P(III)$	0	0	0
$T_P(IV)$	0	0	0
$T_P(V)$	0,15	0	0,25
$T_P(VI)$	0	0	0
$T_P(VII)$	0	0	0
$T_P(VIII)$	–0,36	–0,55	–0,32
$T_P(IX)$	–0,23	–0,22	0,50
Беломорская воздушная масса			
$T_A(I)$	0,18	0,18	0
$T_A(II)$	0	0	0
$T_A(III)$	0	0	0
$T_A(IV)$	0	0	0
$T_A(V)$	–0,15	–0,24	0,44
$T_A(VI)$	0	0	0
$T_A(VII)$	–0,25	–0,24	0
$T_A(VIII)$	–0,38	–0,18	0
$T_A(IX)$	0	0	–0,56
Евроатлантическая воздушная масса			
$T_{СПб}(II)$	0	0	0
$T_{СПб}(V)$	0	0	0
$T_{СПб}(VI)$	0	0	–0,70
$T_{СПб}(VII)$	0	0	0
$T_{СПб}(VIII)$	0,40	0,70	0,44
$T_{СПб}(IX)$	–0,70	–0,70	0
Сибирская воздушная масса			
$T_{Ир}(I)$	0	0	0
$T_{Ир}(II)$	0	0	–0,32
$T_{Ир}(III)$	0	0	0
$T_{Ир}(IV)$	–0,30	–0,26	0
$T_{Ир}(V)$	0,25	0,38	0,35
$T_{Ир}(VII)$	0	–0,26	0,45
Меридиональный градиент температуры			
$\Delta T_1(I)$	–0,12	0	0
$\Delta T_1(II)$	–0,27	–0,24	0
$\Delta T_1(III)$	0	0	–0,45
$\Delta T_1(IV)$	0	–0,16	0
$\Delta T_1(V)$	0	0	0
$\Delta T_1(VIII)$	0	0	0
Зональный градиент температуры			
$\Delta T_2(I)$	0,18	0,20	0
$\Delta T_2(III)$	0,14	0,18	0
$\Delta T_2(VI)$	0,20	0,22	–0,48
$\Delta T_2(VII)$	–0,24	–0,14	0,14
$\Delta T_2(VIII)$	0,10	0,36	0
$\Delta T_2(IX)$	–0,46	–0,28	0,46

Примечание: Предикторы – среднемесячная приземная температура воздуха в пункте, характеризующем теплозапас воздушной массы: T_P – в Ростове - на - Дону, T_A – в Архангельске, $T_{СПб}$ – в Санкт-Петербурге, $T_{Ир}$ – в Иркутске; $\Delta T_1 = T_A - T_{СПб}$; $\Delta T_2 = T_{Ир} - (T_A + T_{СПб})/2$; римской цифрой обозначен месяц.

Таблица 2

Предикторы (x), характеризующие поле приземного давления, и весовые коэффициенты (B) в уравнениях расчета СГДМ для портов Белого и Азовского морей

Предикторы	Весовые коэффициенты		
	Кандалакша	Архангельск	Ростов-на-Дону
<i>Номер года</i>	0	0	–0,075
Исландский минимум			
$Pu(I)$	0,07	0,10	0
$Pu(II)$	0,07	0,08	0,15
$Pu(III)$	0	0	–0,12
$Pu(IV)$	0	–0,12	0
$Pu(V)$	–0,08	–0,13	0,11
$Pu(VI)$	–0,18	–0,14	0
$Pu(VII)$	0,44	0,48	–0,28
$Pu(VIII)$	0	0	0
$Pu(IX)$	0	0,10	0
Сибирский максимум			
$Pc(I)$	–0,10	–0,16	0
$Pc(II)$	0	0	0
$Pc(III)$	0,22	0,12	0
$Pc(IV)$	–0,24	–0,30	0
$Pc(V)$	0	0	–0,70
$Pc(VI)$	0	0	–0,35
$Pc(VII)$	0	0	0
$Pc(VIII)$	–0,50	–0,65	–0,32
$Pc(IX)$	0,70	+0,70	0,70
Азорский максимум			
$Pa(I)$	0	0	0
$Pa(II)$	0	0	0,16
$Pa(III)$	0	0	0
$Pa(IV)$	0	0	–0,40
$Pa(VI)$	0	0	0
$Pa(VII)$	0	0	0
$Pa(VIII)$	0	0	–0,64
$Pa(IX)$	–0,09	0	0
Зональный перенос			
$\Delta P_1(I)$	–0,12	0	0
$\Delta P_1(II)$	0,12	0,17	0
$\Delta P_1(III)$	–0,20	–0,22	–0,56
$\Delta P_1(IV)$	0	0	0
$\Delta P_1(V)$	0	0	0
$\Delta P_1(VI)$	0	0	0
$\Delta P_1(VIII)$	0	0	0
$\Delta P_1(IX)$	–0,24	–0,22	–0,20
Меридиональный перенос			
$\Delta P_2(I)$	0	0	0
$\Delta P_2(V)$	–0,15	–0,18	0
$\Delta P_2(VII)$	0	0	0
$\Delta P_2(IX)$	0	0	0

Примечание. Предикторы – приземное давление в районе соответствующего центра действия атмосферы: P_i – в Рейкьявике, P_c – в Иркутске, P_a – в Понта-Делгада; $\Delta P_1 = P_c - (P_a + P_i)/2$; $\Delta P_2 = P_a - P_i$; римской цифрой обозначен месяц.

В табл. 1 и 2 представлен большой набор предикторов (x), работающих в уравнениях как для СГДМ, так и для всей линейки ледовых характеристик.

Предиктор может иметь нулевые весовые коэффициенты в уравнениях расчета СГДМ, но быть достаточно влиятельным в уравнениях для других характеристик ледового режима. Например, приземное давление в районе исландского минимума в августе $Pu(VIII)$ практически не оказывает влияние на будущую СГДМ в портах Белого и Азовского морей, что следует из табл. 2. Однако этот предиктор используется при расчете первого появления льда в Архангельске (с весовым коэффициентом $-0,30$).

Разложение кривых хода межгодовой изменчивости ледовых параметров на гармонические составляющие осуществлено для всех рядов СГДМ, значений ледовитости морей и ледовых фаз по 31 гармонике.

Исходя из предпосылки принципиальной возможности аналогового долгосрочного прогнозирования, в рамках разработки методики долгосрочного ледового прогноза было сделано предположение о том, что имеется некоторый глобальный период, в который вкладываются все гармоники. Иными словами, на абсциссе времени существуют такие узловые годы, когда ординаты всех гармоник обращаются в ноль.

Периоды циклов для гармоник определялись по ряду приземной температуры воздуха в Санкт-Петербурге, для которого имеется наибольшее число наблюдений. Разложению подвергался 200-летний ряд отклонений СГДМ от генерального тренда. При этом генеральный тренд также описывался длиннопериодной гармоникой, наиболее близко соответствующей полиномиальному тренду 2-го порядка. Для подтверждения универсальности работы гармоник было сделано разложение ряда СГДМ для Архангельска (192 года).

Мерой согласованности фактических и расчетных отклонений от генерального тренда являлся максимальный (пиковый), полученный в процессе перебора вариантов, коэффициент корреляции между значениями двух рядов – фактических отклонений СГДМ и соответствующих значений гармоники (G), описываемых уравнением вида:

$$G = A_g(\sin((Ni - N_0)2\pi/\Delta t) + C_g, \quad (2)$$

где Ni – номер текущего года; N_0 – номер узлового года (значение гармоники совпадает со значением генерального тренда); A_g и C_g – амплитуда и свободный член, определяемые по регрессии между значениями $\sin((Ni - N_0)2\pi/\Delta t)$ и фактическими данными; Δt – период цикла.

Из предположения об общности некоторого узлового года для всех гармоник и наличии глобального периода вытекает, что N_0 – величина, постоянная для всех гармоник, а значение Δt определяется из выражения:

$$\Delta t = \Delta T / m, \quad (3)$$

где ΔT – глобальный период; m – целые числа.

В результате проведения численных экспериментов было установлено, что наилучшие результаты разложения 200-летнего ряда СГДМ по Санкт-Петербургу получаются при установлении узлового года на начало современного летоисчисления, т.е. $N_0=0$, и задании глобального периода $\Delta T = 5044$.

В табл. 3 приведены параметры для 31 гармоник, сумма которых аппроксимирует СГДМ в Санкт-Петербурге и Архангельске, а также коэффициенты корреляции для гармоник (r).

Таблица 3

Параметры гармоник (m и Δt), полученные по рядам СГДМ в Санкт-Петербурге и Архангельске, и коэффициенты корреляции (r) для гармоник

Номер гармоники	m	Δt	r	
			Санкт-Петербург	Архангельск
1 (генеральный тренд)	5	1008,80	0,40	0,23
2	29	173,93	0,07	0,14
3	60	84,07	0,12	0,10
4	198	25,47	0,10	0,10
5	232	21,74	0,18	0,15
6	278	18,14	0,10	0,11
7	372	13,56	0,10	0,14
8	398	12,67	0,11	0,12
9	450	11,21	0,14	0,12
10	516	9,78	0,17	0,10
11	544	9,27	0,18	0,13
12	648	7,84	0,20	0,10
13	666	7,57	0,05	0,12
14	778	6,48	0,07	0,15
15	892	5,65	0,10	0,15
16	952	5,30	0,13	0,22
17	998	5,05	0,16	0,12
18	1024	4,92	0,14	0,11
19	1082	4,66	0,10	0,15
20	1154	4,37	0,13	0,18
21	1192	4,23	0,10	0,10
22	1280	3,94	0,18	0,08
23	1494	3,38	0,13	0,13
24	1640	3,08	0,17	0,19
25	1782	2,83	0,14	0,10
26	1876	2,69	0,10	0,11
27	1948	2,59	0,12	0,11
28	2098	2,40	0,17	0,19
29	2156	2,34	0,12	0,05
30	2234	2,26	0,24	0,16
31	2484	2,03	0,18	0,18
Суммарные r			0,80	0,74

В третьем компоненте методики суммы гармоник аппроксимируют значения СГДМ и ледовых характеристик морей европейской части России [5]. Коэффициенты корреляции между рядами значений, рассчитанных по гармоникам, и соответствующими рядами фактических значений для разных ледовых характеристик и портов варьируют от 0,6 до 0,8.

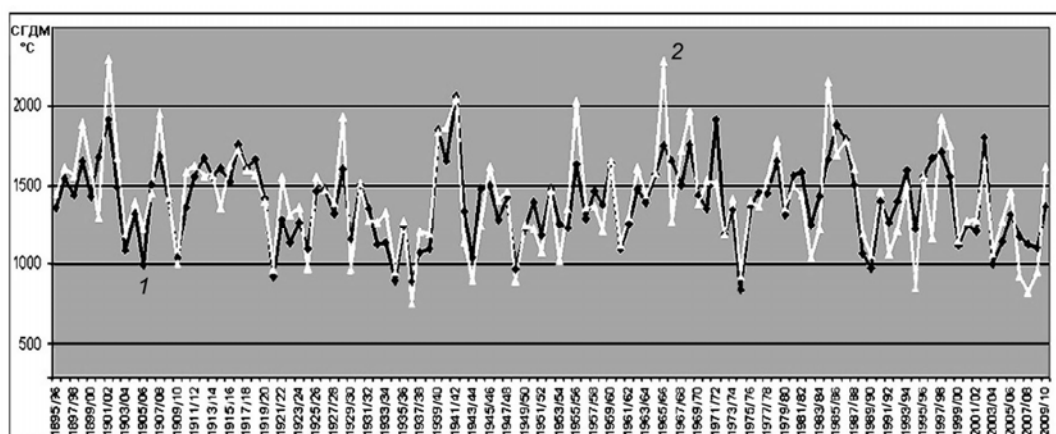
Следует обратить внимание, что прогноз в третьем компоненте осуществляется только по номеру года.

3. Результаты работы метода

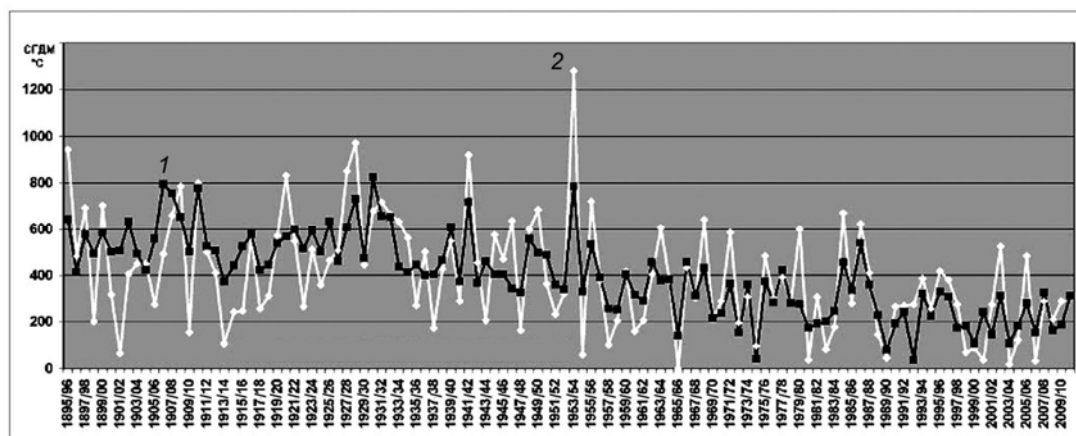
Ниже приведены результаты расчета ледовых условий с помощью ансамблевого (трехкомпонентного) метода для Белого и Азовского морей.

3.1. Прогноз СГДМ в портах Белого и Азовского морей

На рис. 1 представлены данные расчета СГДМ в Архангельске и Ростове-на-Дону.



а)



б)

**Рис. 1. Результаты расчетов СГДМ в Архангельске (а) и Ростове-на-Дону (б) по зависимому (1896–2005 гг.) и независимому (2006–2010 гг.) рядам:
1 – прогностическая величина, 2 – фактическая величина.**

В табл. 4 приведены данные об обеспеченности и эффективности расчетов по зависимому ряду и прогнозов по независимому ряду СГДМ для трех портов.

Таблица 4

Данные об обеспеченности и эффективности расчетов СГДМ по зависимому ряду и прогнозов по независимому ряду для портов Белого и Азовского морей

Кандалакша	Архангельск	Ростов-на-Дону
Длина зависимого ряда (лет)		
93	110	110
Коэффициент корреляции для зависимого ряда r		
0,78	0,80	0,74
Эффективность расчета для зависимого ряда $F_{зав}$, %		
22	19	17
Природная обеспеченность $Q_{пр}$, %		
68	71	68
Среднее квадратическое отклонение σ		
313	305	239
Обеспеченность расчета для зависимого ряда $Q_{зав}$, %		
90	90	85
Число оправдавшихся случаев для независимого ряда (6 лет) по прогностическому методу $N_{пр}$		
6	5	6
Число оправдавшихся случаев для независимого ряда по климату $N_{кл}$		
4	2	4
Эффективность расчета для независимого ряда $F_{незав}$, %		
33	50	33

Мерой обеспеченности расчета и оправдываемости прогноза СГДМ служит среднее квадратическое отклонение (σ), значения которого приведены в табл. 4.

В табл. 5 приведены фактические и рассчитанные данные СГДМ для шести сезонов.

Таблица 5

Фактические (Ф) и прогностические (П) значения СГДМ, оправдываемость (О) прогнозов для портов Белого и Азовского морей

Сезон	СГДМ в Кандалакше			СГДМ в Архангельске			СГДМ в Ростове-на-Дону		
	Ф	П	О	Ф	П	О	Ф	П	О
2005–2006	1243	1399	+	1464	1380	+	485	313	+
2006–2007	1186	1346	+	928	1232	+	31	264	+
2007–2008	947	1157	+	827	1069	+	289	326	+
2008–2009	1084	1372	+	955	1145	+	211	168	+
2009–2010	1506	1635	+	1619	1445	+	290	214	+
2010–2011	1650	1358	+	1754	1078	–	342	285	+

Примечание. Здесь, а также в табл.9, 10, 11, 13, 15 «+» – прогноз оправдался, «–» – прогноз не оправдался.

3.2. Прогноз ледовых фаз в портах Белого и Азовского морей

На рис. 2 в качестве примера представлены данные расчетов дат первого появления льда и окончательного очищения моря ото льда, а также продолжительности ледового периода в Мариуполе.

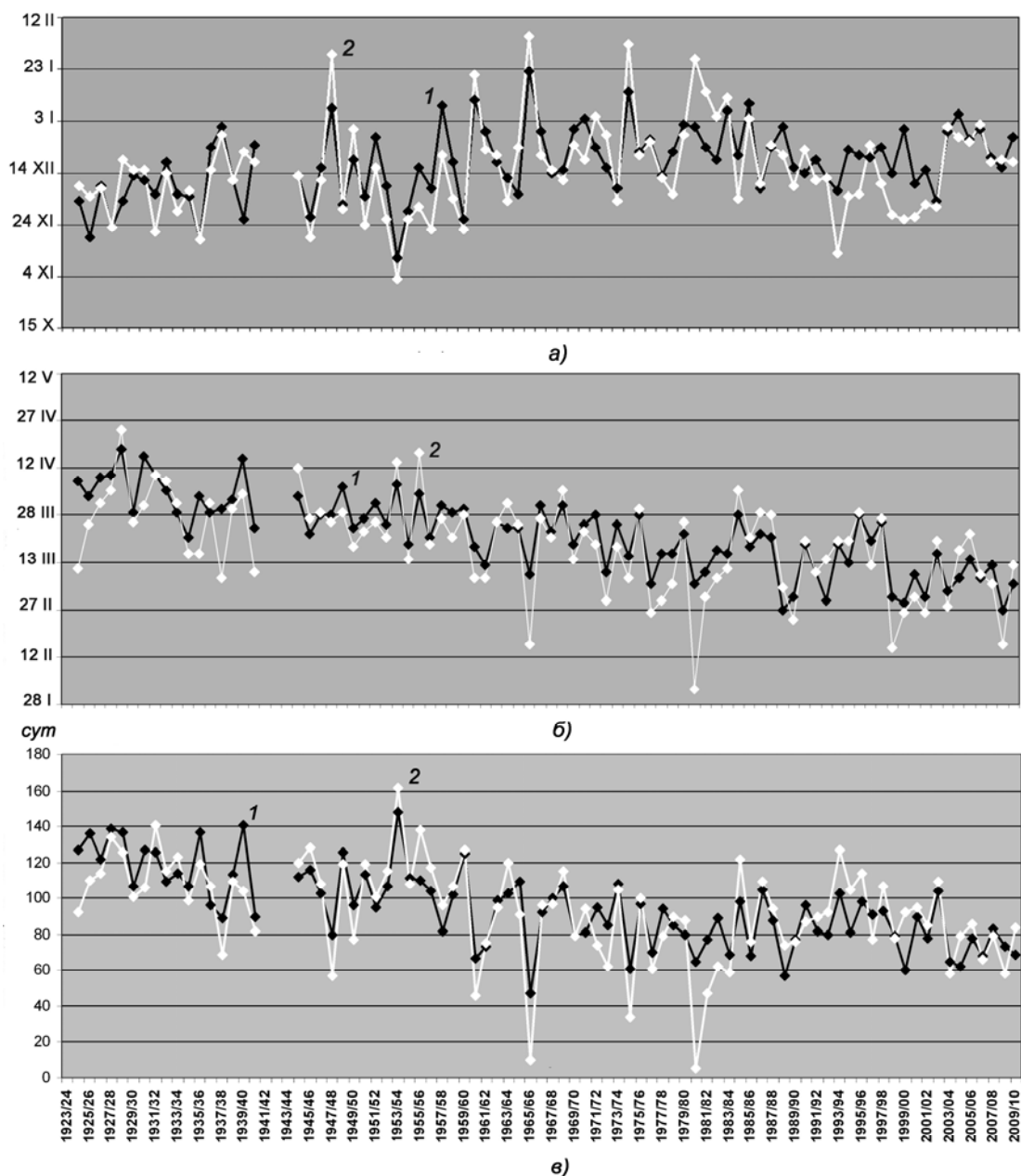


Рис. 2. Результаты расчетов ПП (а), ОО (б), ЛП (в) в Мариуполе:

1 – прогностическая величина, 2 – фактическая величина.

В табл. 6-8 приведены данные об обеспеченности и эффективности расчетов по зависимому ряду и прогнозов по независимому ряду дат первого появления льда, дат окончательного очищения акваторий портов ото льда, продолжительности ледового периода для трех портов.

Таблица 6

Данные об обеспеченности и эффективности расчетов по зависимому ряду и прогнозов по независимому ряду дат первого появления льда в портах Белого и Азовского морей

Кандалакша	Архангельск	Мариуполь
Длина зависимого ряда		
78	110	78
Коэффициент корреляции для зависимого ряда r		
0,80	0,70	0,76
Эффективность расчета для зависимого ряда $F_{зав}, \%$		
24	19	18
Природная обеспеченность $Q_{пр}, \%$		
69	66	72
Среднее квадратическое отклонение σ для ПП		
18	10	18
Обеспеченность расчета для зависимого ряда $Q_{зав}, \%$		
93	85	90
Число оправдавшихся случаев для независимого ряда (6 лет) по прогностическому методу $N_{пр}$		
6	4	6
Число оправдавшихся случаев для независимого ряда по климату $N_{кл}$		
3	3	5
Эффективность расчета для независимого ряда $F_{незав}, \%$		
50	17	17

Таблица 7

Данные об обеспеченности и эффективности расчетов по зависимому ряду и прогнозов по независимому ряду дат окончательного очищения ото льда акваторий портов
Белого и Азовского морей

Кандалакша	Архангельск	Мариуполь
Длина зависимого ряда		
76	110	78
Коэффициент корреляции для зависимого ряда r		
0,88	0,67	0,81
Эффективность расчета для зависимого ряда $F_{зав}, \%$		
36	13	19
Природная обеспеченность $Q_{пр}, \%$		
60	74	72
Среднее квадратическое отклонение σ для ОО		
12	8	15
Обеспеченность расчета для зависимого ряда $Q_{зав}, \%$		
96	87	91
Число оправдавшихся случаев для независимого ряда (6 лет) по прогностическому методу $N_{пр}$		
6	6	6
Число оправдавшихся случаев для независимого ряда по климату $N_{кл}$		
2	6	5
Эффективность расчета для независимого ряда $F_{незав}, \%$		
67	0	17

Таблица 8

**Данные об обеспеченности и эффективности расчетов по зависимому ряду и прогнозов по
независимому ряду продолжительности ледового периода
в портах Белого и Азовского морей**

Кандалакша	Архангельск	Мариуполь
Длина зависимого ряда		
76	110	78
Эффективность расчета для зависимого ряда $F_{зав}$, %		
33	20	17
Природная обеспеченность $Q_{пр}$, %		
63	66	74
Среднее квадратическое отклонение σ для ЛП		
27	13	27
Обеспеченность расчета для зависимого ряда $Q_{зав}$, %		
96	86	92
Число оправдавшихся случаев для независимого ряда (6 лет) по прогностическому методу $N_{пр}$		
6	5	6
Число оправдавшихся случаев для независимого ряда по климату $N_{кл}$		
2	4	4
Эффективность расчета для независимого ряда $F_{незав}$, %		
67	16	33

В табл. 9–11 приведены фактические и рассчитанные данные ПП, ОО, ЛП для шести сезонов.

Мерой обеспеченности расчета и оправдываемости прогноза для ПП, ОО, ЛП служит среднее квадратическое отклонение (σ), значения которого для различных ледовых характеристик приведены в табл. 6–8.

Таблица 9

**Фактические (Ф) и прогностические (П) значения ПП,
оправдываемость (О) прогнозов для портов Белого и Азовского морей**

Сезон	ПП в Кандалакше			ПП в Архангельске			ПП в Мариуполе		
	Ф	П	О	Ф	П	О	Ф	П	О
2005-2006	8.12	8.12	+	1.12	18.11	–	26.12	27.12	+
2006-2007	15.11	27.11	+	28.10	15.11	–	2.1	31.12	+
2007-2008	3.12	27.11	+	12.11	15.11	+	18.12	20.12	+
2008-2009	28.11	11.12	+	24.11	16.11	+	19.12	16.12	+
2009-2010	7.12	5.12	+	8.11	11.11	+	18.12	28.12	+
2010-2011	15.11	23.11	+	10.11	7.11	+	11.1	27.12	+

Таблица 10

**Фактические (Ф) и прогностические (П) значения ОО,
оправдываемость (О) прогнозов для портов Белого и Азовского морей**

Сезон	ОО в Кандалакше			ОО в Архангельске			ОО в Мариуполе		
	Ф	П	О	Ф	П	О	Ф	П	О
2005-2006	24.4	25.4	+	5.5	5.5	+	22.3	14.3	+
2006-2007	15.4	25.4	+	10.5	3.5	+	9.3	8.3	+
2007-2008	27.4	22.4	+	10.5	5.5	+	6.3	12.3	+
2008-2009	5.5	3.5	+	12.5	5.5	+	16.2	27.2	+
2009-2010	3.5	29.4	+	4.5	7.5	+	12.3	6.3	+
2010-2011	10.5	28.4	+	7.5	6.5	+	26.3	11.3	+

Таблица 11

**Фактические (Ф) и прогностические (П) значения ЛП,
оправдываемость (О) прогнозов для портов Белого и Азовского морей**

Сезон	ЛП в Кандалакше			ЛП в Архангельске			ЛП в Мариуполе		
	Ф	П	О	Ф	П	О	Ф	П	О
2005-2006	137	139	+	155	168	+	86	78	+
2006-2007	151	150	+	194	169	–	66	68	+
2007-2008	145	147	+	180	171	+	79	83	+
2008-2009	158	144	+	169	170	+	58	73	+
2009-2010	147	146	+	177	177	+	84	69	+
2010-2011	176	157	+	178	180	+	74	75	+

3.3. Прогноз максимальной за зиму ледовитости Белого и Азовского морей

На рис. 3 для примера представлены результаты расчета ледовитости Белого (северная часть) моря.

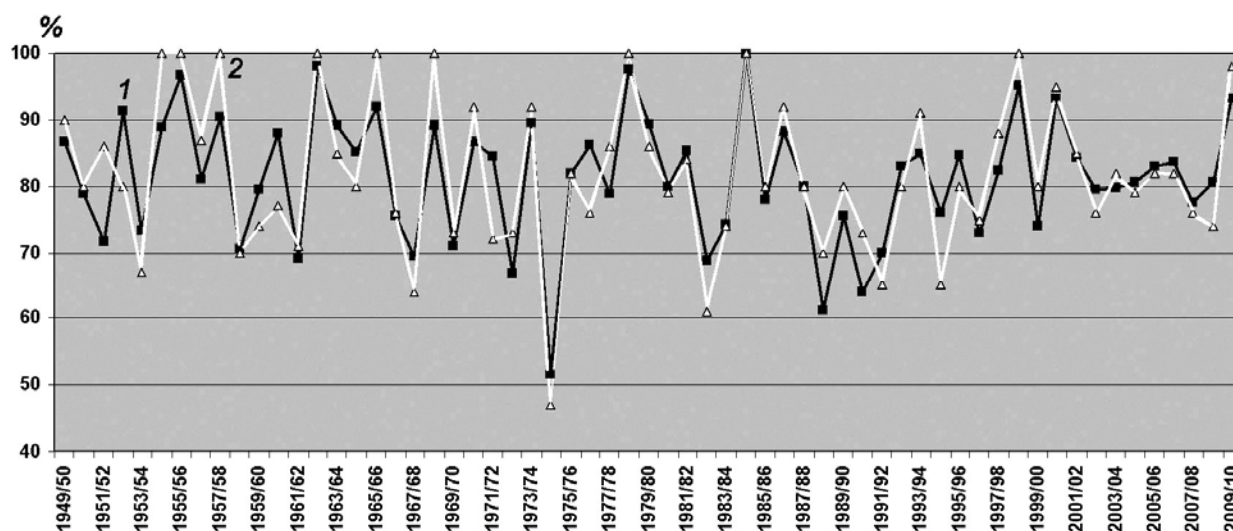


Рис. 3. Результаты расчета максимальной за ледовый сезон ледовитости Белого моря:

1 – прогностическая величина, 2 – фактическая величина.

В табл. 12 приведены данные об обеспеченности и эффективности расчетов по зависимому ряду и прогнозов по независимому ряду ледовитости Белого и Азовского морей.

Таблица 12

Данные об обеспеченности и эффективности расчетов по зависимому ряду и прогнозов по независимому ряду ледовитости Белого и Азовского морей

Белое море (Воронка)	Азовское море
Длина зависимого ряда	
56	56
Коэффициент корреляции для зависимого ряда r	
0,85	0,84
Эффективность расчета для зависимого ряда $F_{зав}$, %	
25	28
Природная обеспеченность $Q_{пр}$, %	
71	68
Среднее квадратическое отклонение σ	
12	32
Обеспеченность расчета для зависимого ряда $Q_{зав}$, %	
96	96
Число оправдавшихся случаев для независимого ряда (6 лет) по прогностическому методу $N_{пр}$	
6	6
Число оправдавшихся случаев для независимого ряда по климату $N_{кл}$	
5	5
Эффективность расчета для независимого ряда $F_{незав}$, %	
17	17

В табл. 13 приведены фактические и рассчитанные данные МЛ для шести сезонов. Мерой обеспеченности расчета и оправдываемости прогноза МЛ служит среднее квадратическое отклонение (σ), значения которого приведены в табл. 12.

Таблица 13

Фактические (Ф) и прогностические (П) значения МЛ, оправдываемость (О) прогнозов для портов Белого и Азовского морей

Сезон	МЛ в Кандалакше			МЛ в Архангельске		
	Ф	П	О	Ф	П	О
2005-2006	82	83	+	97	66	+
2006-2007	82	84	+	26	52	+
2007-2008	76	78	+	96	90	+
2008-2009	74	81	+	62	55	+
2009-2010	98	93	+	57	68	+
2010-2011	92	82	+	64	74	+

3.4. Прогноз максимальной за зиму толщины льда в портах Белого и Азовского морей

В табл. 14 приведены данные об обеспеченности и эффективности расчетов по зависимому ряду и прогнозов по независимому ряду максимальной за зиму толщины льда в портах.

Таблица 14

Данные об обеспеченности и эффективности расчетов по зависимому ряду и прогнозов по независимому ряду максимальной за зиму толщины льда в портах Белого и Азовского морей

Кандалакша	Архангельск	Мариуполь
Длина зависимого ряда		
73	92	79
Коэффициент корреляции для зависимого ряда r		
0,77	0,78	0,83
Эффективность расчета для зависимого ряда $F_{зав}, \%$		
21	19	32
Природная обеспеченность $Q_{пр}, \%$		
67	73	62
Среднее квадратическое отклонение σ		
12	14	18
Обеспеченность расчета для зависимого ряда $Q_{зав}, \%$		
88	92	94
Число оправдавшихся случаев для независимого ряда (6 лет) по прогностическому методу $N_{пр}$		
4	6	6
Число оправдавшихся случаев для независимого ряда по климату $N_{кл}$		
2	6	5
Эффективность расчета для независимого ряда $F_{незав}, \%$		
34	0	17

В табл. 15 приведены фактические и рассчитанные данные МТ для шести сезонов. Мерой обеспеченности расчета и оправдываемости прогноза МТ служит среднее квадратическое отклонение (σ), значения которого приведены в табл. 14.

Таблица 15

Фактические (Ф) и прогностические (П) значения МТ, оправдываемость (О) прогнозов для портов Белого и Азовского морей

Сезон	МТ Кандалакша			МТ Мудьюг			МТ Мариуполь		
	Ф	П	О	Ф	П	О	Ф	П	О
2005-2006	67	71	+	66	71	+	39	29	+
2006-2007	48	62	–	58	71	+	0	3	+
2007-2008	42	54	+	59	67	+	35	37	+
2008-2009	55	66	+	61	54	+	27	17	+
2009-2010	82	82	+	79	68	+	31	19	+
2010-2011	93	65	–	80	74	+	20	19	+

Выводы

1. Средняя для всех пунктов эффективность ансамблевого метода по зависимым рядам составляет для элементов ледового режима:

- сумма градусодней мороза (СГДМ) – 19 % при обеспеченности 88 %;
- первое появление льда (ПП) – 20 % при обеспеченности 89 %;
- дата окончательного очищения ото льда (ОО) – 23 % при обеспеченности 91 %;
- продолжительность ледового периода (ЛП) – 23 % при обеспеченности 91 %;
- максимальная за ледовый сезон средняя месячная ледовитость моря (МЛ) – 26 % при обеспеченности 96 %;
- максимальная за ледовый сезон толщина припайного льда (МТ) – 24 % при обеспеченности 91 %.

2. Средняя эффективность прогнозов по независимому 6-летнему ряду (с ледового сезона 2005-2006 гг. по сезон 2010-2011 гг.):

- сумма градусодней мороза (СГДМ) – 39 % при обеспеченности 94 %;
- первое появление льда (ПП) – 28 % при обеспеченности 89 %;
- дата окончательного очищения ото льда (ОО) – 26 % при обеспеченности 100 %;
- продолжительность ледового периода (ЛП) – 35 % при обеспеченности 94 %;
- максимальная за ледовый сезон средняя месячная ледовитость моря (МЛ) – 17 % при обеспеченности 100 %;
- максимальная за ледовый сезон толщина припайного льда (МТ) – 17 % при обеспеченности 89 %.

Заключение

Таким образом, расчет ледовых характеристик ансамблевым методом для ряда пунктов неарктических морей по зависимому и независимому рядам дал удовлетворительный результат. Тем не менее метод нуждается в дальнейшем совершенствовании: включении в уравнения новых значимых предикторов, фильтрации используемых предикторов.

Ряд полученных уравнений в совокупности является статистической моделью эволюции ледяного покрова неарктических морей. Поскольку во всех уравнениях весовые коэффициенты нормированы единообразно, т.е. от 0 до 0,7 по абсолютной величине, то пространственное распределение их значений при широкой географии пунктов, для которых осуществляется расчет, дает объективную картину влияния того или иного предиктора на конкретную ледовую характеристику. Следовательно, данный подход может быть использован в качестве метода исследования формирования различных тенденций в

процессе эволюции ледового покрова на неарктических морях. В статье [8] приведены результаты анализа пространственного и временного влияния наиболее значимых предикторов на характер зим на морях европейской части России, различные ледовые характеристики. Такой подход позволяет выявить причинно-следственные связи в процессе воздействия термобарических полей на характеристики будущего ледового сезона и дать количественную оценку активности этих связей.

В решении ЦМКП от 14 декабря 2011 г. отмечено, что испытанный метод долгосрочного прогноза ледовых условий на Белом и Азовском морях обеспечивает прогнозирование ряда характеристик по портам Белого и Азовского морей с заблаговременностью от 2 до 8 месяцев.

ЦМКП одобрила результаты испытаний метода и рекомендовала ФГБУ «Гидрометцентр России» включить данный метод в практику составления ледовых прогнозов в качестве основного метода.

Список литературы

1. *Абузаров З.К., Думанская И.О., Нестеров Е.С.* Оперативное океанографическое обслуживание. – Обнинск: ООО «ИГ-СОЦИН», 2009. – 286 с.
2. *Абузаров З.К., Кудрявая К.И., Серяков Е.И., Скриптунова Л.И.* Морские прогнозы. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 320 с.
3. *Гудкович З.М., Кириллов А.А., Ковалев Е.Г. и др.* Основы методики долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 348 с.
4. *Думанская И.О.* Зависимость ледовитости Белого моря от макроциркуляционных атмосферных процессов // Труды Гидрометцентра России. – 2004. – Вып. 339. – С. 55–63.
5. *Думанская И.О.* Методика долгосрочного прогноза ледовых условий на европейских морях России // Метеоспектр. – 2009. – № 4. – С. 88–96.
6. *Думанская И.О.* Оценка возможности использования вероятностных характеристик дрейфующего льда и численной модели перераспределения льда в Белом море для гидрометеорологического обеспечения морских транспортных операций в условиях климатических изменений // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2007. – № 77. – С. 128–142.
7. *Думанская И.О., Котилевская А.М.* Оценка возможности использования в современной практике ледового обслуживания мореплавания прогностических методик XX века на неарктических морях России // Труды Гидрометцентра России. – 2009. – Вып. 343. – С. 67–88.
8. *Думанская И.О.* Анализ влияния центров действия атмосферы на характер зим на морях европейской части России // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 345. – С. 56–82.
9. *Думанская И.О.* Метод долгосрочного прогноза ледовых условий на Белом и Азовском морях // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 345. – С. 83–104.

10. *Думанская И.О.* О методике долгосрочного прогноза ледовых условий на европейских морях России // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 11. – С. 64–76.

СИСТЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕЕ ИСПЫТАНИЙ ДЛЯ АКВАТОРИЙ АЗОВСКОГО, ЧЕРНОГО И КАСПИЙСКОГО МОРЕЙ

Введение

С 2010 года в ФГБУ «Гидрометцентр России» осуществляется поэтапное введение в эксплуатацию компонентов системы, предназначенной для оперативного прогнозирования ветрового волнения в Мировом океане и в морях России: Черном, Азовском, Каспийском, Балтийском, Баренцевом, Белом. Система, разработанная в ходе осуществления подпрограммы ЕСИМО ФЦП «Мировой океан», обеспечивает прогнозирование характеристик ветрового волнения (высоты значительных волн; англ. significant wave height, SWH), среднего направления распространения, средней длины, среднего периода, высоты и направления распространения ветровых волн, высоты и направления распространения волн зыби) на сроки до 5 суток.

Прогнозы составляются на основе расчетов по спектральной модели ветрового волнения с использованием метеорологической прогностической информации. На первом этапе внедрения системы прогнозирования характеристик ветрового волнения проведены испытания для акваторий Азовского, Черного и Каспийского морей.

1. Прогностическая модель

Расчетным ядром прогностической системы служит открытый программный код спектральной модели ветрового волнения WaveWatch III v 3.14 [16], которая относится к моделям третьего поколения, основанным на решении сеточными методами уравнения баланса спектрального волнового действия в приближении фазового осреднения. В модели учитываются основные процессы развития волн под действием ветра, перераспределение энергии по спектру вследствие нелинейных взаимодействий, процессы ослабления волн из-за донного трения, обрушения, рассеяния энергии на донных неоднородностях. Допускается учет влияния течений, приливов, островов подсеточного масштаба и ледового покрова. Предусматривается возможность построения вложенных сеток с меняющимся разрешением

в различных областях и с автоматическим связыванием расчетного процесса на границах областей. Реализуется распараллеливание вычислений средствами OpenMP и средствами MPI.

Программный код волновой модели позволяет по входным данным (скорости приводного ветра, скорости поверхностного течения, уровня воды и разности температур вода–воздух, сплоченности морского льда) рассчитывать изменения со временем спектральной плотности распределения дисперсии отклонений поверхности моря. По известной спектральной плотности определяются производные величины, представляющие практический интерес для потребителей морской информации, такие как высота значительных волн (SWH), средняя длина волн, средний период, направление распространения волн и т.д.

Из множества предлагаемых в пакете WaveWatch III вариантов описания различных механизмов развития и эволюции волн выбран вариант параметризации ветрового воздействия и диссипации WAM4 с набором параметров BAJ [16]. Расчеты проводятся на регулярной двумерной сетке по пространству, регулярной сетке по направлениям волн и логарифмической сетке по частотам волн. Дискретные значения частот определяются рядом из 25 членов геометрической прогрессии со знаменателем 1.1 и начальным значением 0,042 Гц. Направления распространения от 0 до 360° дискретизируются с шагом 15° (24 направления). Для прогностических расчетов используется конфигурация модели с вложенными сетками, позволяющая детализировать прогноз для отдельных частей морских бассейнов (мелководных акваторий, заливов, проливов и т.д.).

Помимо расчетного ядра, система включает в себя средства конфигурирования расчетных областей, подготовки входной информации и представления прогностической продукции на Web сайте и в системе распределенных баз данных (СРБД) ЕСИМО.

2. Расчетные области

Расчетные области, аппроксимирующие конфигурацию берегов и батиметрию реальных морских бассейнов, в прогностической модели определяются на регулярных широтно-долготных сетках. Необходимые для проведения расчетов батиметрия и соответствующая ей маска суша–море для каждого из бассейнов построены с использованием навигационных карт, а также данных ресурсов GEBCO [17], ETOPO и GSHSS, с разрешением, соответствующим масштабу карты 1:250000 [18].

Основные характеристики расчетных конфигураций системы прогнозирования ветрового волнения представлены в табл. 1. Курсивом в таблице выделены опции, которые не использовались при испытаниях системы.

Таблица 1

Морские бассейны и расчетные сетки в системе прогнозирования ветрового волнения

Основной бассейн	Вложенные регионы	Сетка	Заблаговременность / дискретность, ч	Прогноз ветра
Черное море	Черное море	6,0'×6,0' (~10 км)	120/3	<i>ПЛАВ</i> , GFS
	Азовское море	1,2'×1,2' (~2 км)	120/3, 48/3	<i>ПЛАВ</i> , GFS, <i>COSMO</i>
	Керченский пролив	0,3'×0,3' (~0,5 км)	24/1	<i>COSMO</i>
Каспийское море	Каспийское море	3,6'×3,6' (~6 км)	120/3	<i>ПЛАВ</i> , GFS
	Северный Каспий	1,2'×1,2' (~2 км)	120/3	<i>ПЛАВ</i> , GFS

3. Источники входной метеорологической информации

В качестве входной информации для прогнозирования характеристик волнения используются прогностические поля скорости ветра, температуры воды и воздуха, а также сведения о ледовом покрове (сплоченности морского льда). В океанографических приложениях такого рода информация часто называется атмосферным форсингом.

Прогнозы метеорологических полей берутся из нескольких оперативных источников, в их числе продукция двух глобальных прогностических моделей, ПЛАВ и GFS, а также система мезомасштабного прогнозирования COSMO-RU. Полулагранжева модель ПЛАВ, разработанная в Гидрометцентре России совместно с ИВМ РАН [4], решениями ЦМКП Росгидромета от 27.01.2006 г. и от 29.11.2007 г. рекомендована к внедрению в Гидрометцентре России для прогноза полей метеорологических величин в свободной атмосфере и давления на уровне моря [5, 6]. Выходная продукция системы GFS (Global Forecasting System), функционирующей в метеорологическом центре NCEP/NOAA (США), поступает в оперативном режиме в Гидрометцентр России по специализированным каналам. Система мезомасштабного прогнозирования COSMO-RU [1, 3] обеспечивает получение метеорологической информации с более высоким, чем в глобальных моделях, пространственным разрешением.

Дублирование источников метеорологического прогноза предусмотрено для повышения надежности функционирования системы прогнозирования волнения. При поступлении оперативных данных из нескольких метеорологических систем приоритет отдается продукции с более высокими характеристиками оправдываемости прогнозов полей

ветра по данным регулярного мониторинга их качества. Основные спецификации метеорологических прогностических систем, обеспечивающих поступление оперативных данных атмосферного форсинга для прогнозирования характеристик ветрового волнения, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Основные характеристики систем прогноза метеорологических полей, продукция которых используется для задания атмосферного форсинга в прогностических расчетах параметров ветрового волнения

Прогностическая система Выпускающий центр	Регион	Разрешение	Стартовые сроки прогноза, ч ВСВ	Заблаговременность прогнозов, ч	Дискретность, ч
ПЛАН <i>Гидрометцентр России</i>	Глобус	$\sim 0,9^\circ$	00, 12	0–120	3
GFS <i>NCEP/NOAA</i>	Глобус	$\sim 0,2^\circ$	00, 06, 12, 18	0–192	3
COSMO-RU07 <i>Гидрометцентр России</i>	ЕТР	~ 7 км	00, 12	0–78	3
COSMO-RU07 <i>Гидрометцентр России</i>	ЕТР	~ 7 км	12, 18	0–24	1

Сведения о сплоченности ледового покрова берутся из Интернет-источников (MMAB/NCEP; Bremen University).

4. Начальные условия и порядок составления прогнозов

Начальные условия для каждого из прогнозов, представляющие собой спектральную плотность распределения дисперсии отклонений поверхности моря в момент старта прогноза, задаются по данным предыдущего суточного прогноза. Разработана также процедура разгона модели из состояния покоя по данным последовательных анализов полей ветра, предшествующих старту прогноза.

Ежедневное составление прогнозов реализуется запуском двух вычислительных задач на ЭВМ Altix 4700 с распараллеливанием вычислений в режиме MPI на 110 процессорах. Расчет ведется на сроки до 120 ч с периодичностью выдачи прогностических результатов 3 ч для представления пользователям и 15 мин для определения показателей оправдываемости.

Для Черного и Азовского морей прогнозы рассчитываются в рамках единой задачи, построенной по технологии multi-grid с разными пространственными шагами сеток (см. табл. 1). Запуск расчетной задачи осуществляется в 4:40 ч ВСВ от стартового срока 00 ч ВСВ. Время счета составляет около 19 мин.

Для Каспийского моря прогноз рассчитывается для всей акватории моря с детализацией расчетов на измельченной сетке в Северном Каспии в рамках единой задачи (табл. 1). Запуск задачи осуществляется в 0:20 ч ВСВ от стартового срока 18 ч ВСВ. Время счета составляет около 29 мин.

Представляемые оценки качества прогнозов рассчитывались за период с 15 апреля по 30 ноября 2011 г., в течение которого составлено 230 прогнозов для каждого из трех морей.

5. Данные измерений и показатели качества прогнозов

Оправдываемость прогнозов определялась путем поточечного сопоставления прогностических значений SWH с данными спутниковых измерений из базы данных RADS (Radar Altimeter Database System), поддерживаемой в Дельфтском институте исследований Земли из космоса (Delft Institute for Earth-Oriented Space research – DEOS) [12]. База пополняется данными измерений со спутников серии «Earth Resources»: Jason-1, Jason-2, Envisat-1, ERS-2. Сетка треков трех из этих спутников в Черноморско-Каспийском регионе и средняя плотность измерений SWH на акватории Черного моря показаны на рис. 1.

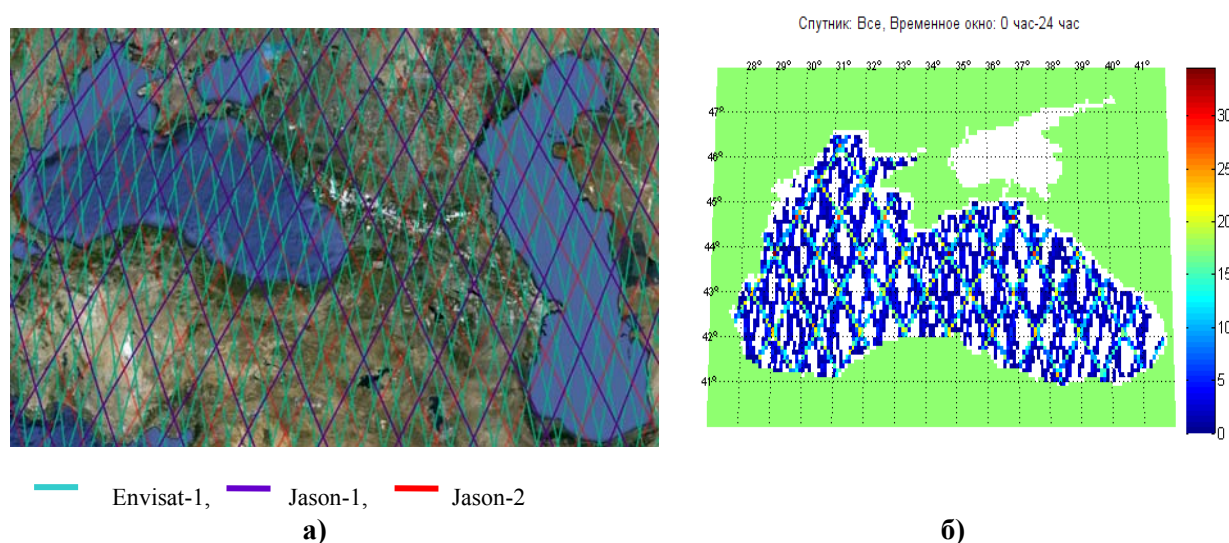


Рис. 1. Положение треков спутников Envisat-1, Jason-1 и Jason-2 в Черноморско–Каспийском регионе (а) и средняя плотность измерений (количество измерений в сутки в ячейках 1°× 1°) для Черного моря (б).

Погрешность спутниковых измерений SWH после калибровки, устраняющей смещения, согласно [13], составляет $\max(0,4 \text{ м}, 0,1 \times \text{SWH}_{\text{measured}})$. По данным другого источника [7], средняя ошибка, т.е. смещение, составляет 13–20 см, а относительная

погрешность – 5–8 %. Для дополнительной фильтрации шумов из исходного массива данных отбирались только такие измерения, для которых стандартное отклонение сигнала, регистрируемого свыше 1700 раз в секунду и затем осредненного за интервалы времени в 1 с, не превышало 0,1 м. Из рассмотрения исключались также случаи, для которых модельные или измеренные значения SWH не превышали 0,05 м. В итоге количество наблюдений, использованных для поточечной оценки оправдываемости прогнозов за период испытаний, составило 371 для Азовского моря, 5637 – для Черного моря и 4424 – для Каспийского моря.

Основным показателем качества прогнозов в соответствии с [2] служит общая оправдываемость $P(\%) = (m/n) \cdot 100$, m – число оправдавшихся прогнозов; n – общее число прогнозов. При поточечном сравнении оправдавшимися считались прогнозы, результаты расчетов которых отличались от измерений не более чем на 30 %. Прогнозы волн с высотой до 1 м считались оправдавшимися при любой действительной высоте волн от 0 до 1 м.

Кроме того, рассчитывались средние отклонения прогностических значений SWH от наблюдаемых (смещения), среднеквадратичные ошибки и коэффициенты корреляции между фактическими (измеренными) и прогностическими значениями.

В ходе оперативных испытаний рассчитанные в узлах регулярной сетки прогностические значения SWH путем билинейной интерполяции приводились в подспутниковые точки измерений, в общем случае имеющие произвольные координаты. Так как спутниковые измерения SWH, в отличие от стандартных гидрометеорологических наблюдений, относятся еще и к произвольным моментам времени, то вышеперечисленные показатели качества рассчитывались в суточном временном окне, соответствующем заблаговременности прогнозов от одних до пяти суток.

6. Результаты испытаний

Примеры диаграмм рассеяния, дающих наглядное представление о степени соответствия прогностических и измеренных значений SWH для прогнозов разной заблаговременности, приведены на рис. 2.

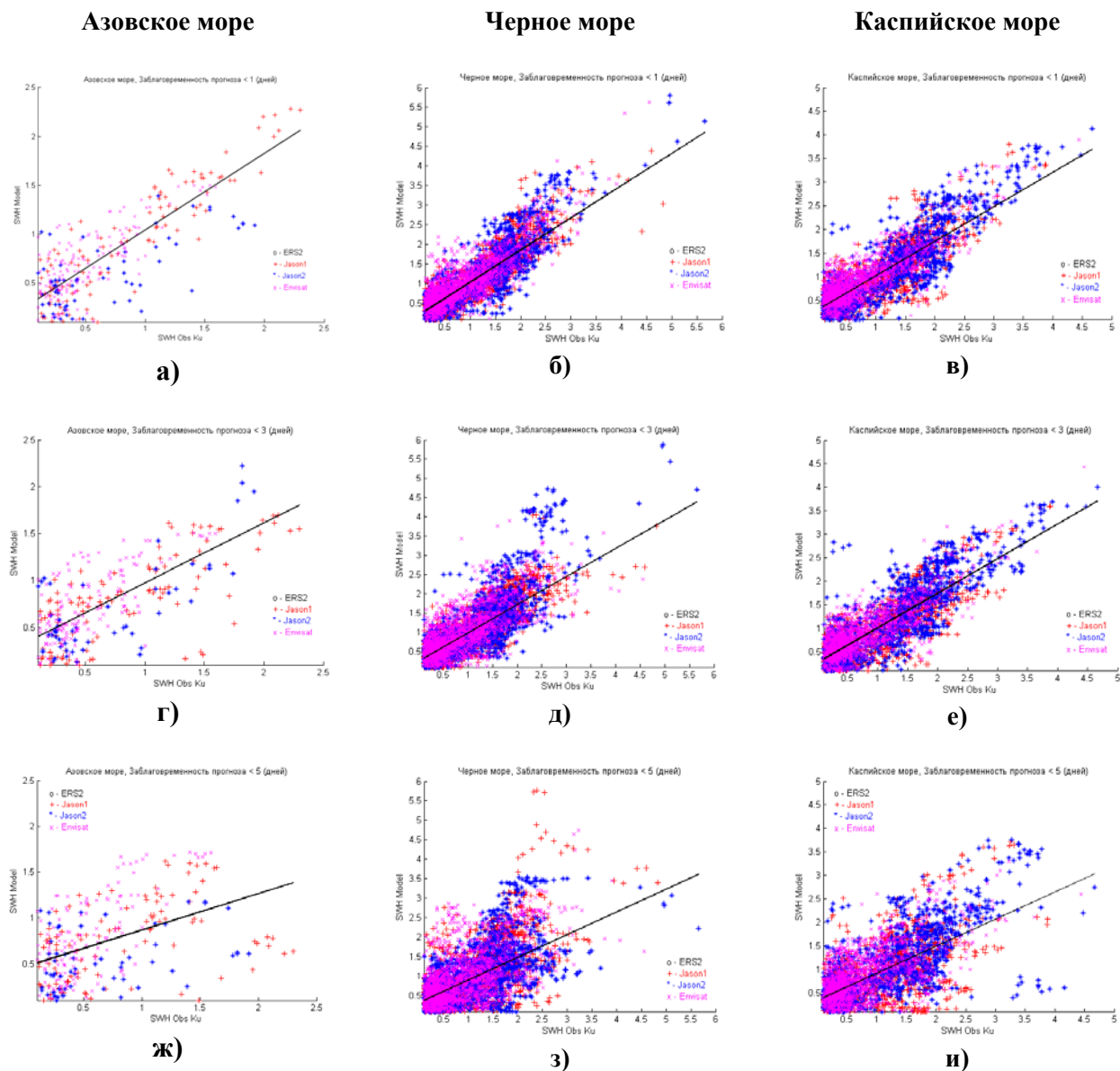


Рис. 2. Диаграммы рассеяния прогностических (по вертикальной оси) и измеренных (по горизонтальной оси) значений SWH за период 15.04 – 30.11 2011 г. на первые (а, б, в), третьи (г, д, е) и пятые (ж, з, и) сутки прогнозов в Азовском, Черном и Каспийском морях. Прямыми линиями показана линейная аппроксимация данных методом наименьших квадратов.

Цифровые показатели качества прогнозов для Азовского, Черного и Каспийского морей приведены в табл. 3. В таблице: ME – средняя ошибка прогнозов (смещение); RMSE – среднеквадратичная ошибка; P – оправдываемость [2]; CW – коэффициент корреляции между прогнозами и наблюдениями; CeWV – коэффициент корреляции между ошибками прогнозов SWH и ошибками прогнозов скорости ветра.

Таблица 3

Показатели качества прогнозов SWH по трём морям за период 15.04–30.11 2011 г.

Сутки прогноза	Количество сравнений с наблюдениями	ME, м	RMSE, м	P, %	CW	CeWV
Азовское море						
1	371	–0,08	0,30	94,6	0,80	0,57
2	371	–0,10	0,30	93,5	0,80	0,57
3	371	–0,14	0,36	90,0	0,70	0,69
4	371	–0,15	0,40	84,9	0,59	0,76
5	371	–0,16	0,45	81,1	0,48	0,82
Черное море						
1	5637	0,01	0,36	87,3	0,87	0,48
2	5637	–0,01	0,40	83,3	0,83	0,57
3	5637	–0,03	0,44	81,3	0,80	0,61
4	5637	–0,04	0,50	76,4	0,74	0,67
5	5637	–0,09	0,56	71,6	0,65	0,71
Каспийское море						
1	4424	–0,05	0,35	87,3	0,85	0,47
2	4424	–0,06	0,36	87,6	0,85	0,52
3	4424	–0,07	0,38	86,1	0,83	0,54
4	4423	–0,07	0,47	78,7	0,75	0,63
5	4424	–0,13	0,49	77,1	0,69	0,62

Как видно из таблицы, абсолютные значения смещений (средних значений ошибок) в течение периода испытаний были сравнительно малы, слегка возрастают с увеличением заблаговременности от 0,01–0,08 до 0,09–0,16 м. В большинстве случаев смещения оставались отрицательными, что свидетельствует о некотором занижении прогностических высот волн в сравнении с измерениями.

Оправдываемость прогнозов SWH, оцениваемая в соответствии с [2], составила 87,3–94,6 % (коэффициент корреляции 0,80–0,85) на первые сутки, 83,3–93,5 % (коэффициент корреляции 0,80–0,85) на вторые сутки, 81,3–90,0 % (коэффициент корреляции 0,70–0,80) на третьи сутки, 76,4–84,9 % (коэффициент корреляции 0,59–0,77) на четвертые сутки и 71,6–81,1 % (коэффициент корреляции 0,48–0,69) на пятые сутки. Среднеквадратичная ошибка прогнозов SWH увеличивалась с ростом заблаговременности от 0,3–0,36 м для первых суток до 0,45–0,56 м для пятых суток.

Снижение качества прогнозов с увеличением заблаговременности в значительной степени определялось увеличением ошибок прогностических данных о скорости ветра,

используемых в качестве входной информации в расчетной модели ветрового волнения. Это подтверждается стабильным увеличением корреляции ошибок прогнозов SWH и ветра с ростом заблаговременности (см. последний столбец табл. 3). Этот результат свидетельствует о том, что можно ожидать повышение оправдываемости прогнозов SWH с повышением качества прогнозов скорости ветра и, кроме того, указывает на перспективность прогностической системы, которая может функционировать в течение ближайших лет без существенных изменений.

7. Сопоставление результатов с другими прогностическими системами

Непосредственное сопоставление испытанной прогностической системы для акваторий Азовского, Черного и Каспийского морей с другими прогностическими системами в их применении к этим же акваториям провести не удастся из-за отсутствия сведений о сертификации и показателях качества таких систем.

В литературных источниках, однако, можно найти сведения о показателях качества прогнозов ветрового волнения для других морских бассейнов. В табл. 4 приведены среднеквадратичные ошибки и коэффициенты корреляции между прогнозами и наблюдениями для некоторых аналогичных зарубежных прогностических систем, основанных на использовании спектральных моделей ветрового волнения.

Как видно из таблицы, показатели качества испытанной прогностической системы в терминах среднеквадратичной ошибки и коэффициента корреляции сопоставимы с таковыми для известных по литературным источникам зарубежных систем.

Таблица 4

Среднеквадратичные ошибки RMSE и коэффициенты корреляции CW между прогностическими и наблюдаемыми значениями SWH для некоторых зарубежных прогностических систем

Ссылка	Регион	Модель	RMSE, м	CW
Silva F. Sansana et al, 2009 [14]	Прибрежные зоны Пиренейского п-ва	Wavewatch III SWAN	0,25–0,58	
Li Jian-Guo et al, 2007 [11]	Северная Атлантика	NAEW	0,646	0,88
Janssen P. et al, 1997 [10]	Мировой океан	WAM	0,2–1,0	0,95–0,2
Da Rocha R. P. et al, 2003 [9]	Прибрежные зоны Бразилии	WaveWatch III	0,66–1,59	0,7–0,86
Chu P. C. et al, 2004 [8]	Южно-Китайское море	WaveWatch III	0,38–0,65	0,55–0,95
Sølvsteen C., Hansen C., 2006 [15]	Прибрежные воды Дании	WaveWatch III	0,35–0,45	

В терминах оправдываемости прогнозов, определяемой согласно [2], оказывается возможным сравнение с методом прогноза ветрового волнения в арктических морях (ФГБУ «ААНИИ», авторы – В.В. Алексеев, В.И. Дымов, Т.А. Пасечник, Н.П. Яковлева). Оценки оправдываемости этого метода, рассматривавшиеся на заседании ЦМКП 26.10.2010 г., определялись на основе сравнения со спутниковыми данными Jason-1, Jason-2, Envisat, Cryosat-2 в 10 точках арктических морей за более длительный, по сравнению с испытаниями данной системы, период (01.2008–07.2010 гг.), из которого исключены временные интервалы с наличием льда. Эти оценки приведены в табл. 5 вместе с оценками представляемой системы.

Как видно из таблицы, оправдываемость испытанного метода превосходит оправдываемость метода ФГБУ «ААНИИ». Следует, однако, иметь в виду, что сопоставление с методом ААНИИ может рассматриваться лишь как ориентировочное, так как приводимые оценки относятся к разным морским бассейнам, получены для различных периодов испытаний и могут различаться техникой отбора спутниковых данных и их сравнения с прогнозами.

Таблица 5

Оправдываемость прогнозов SWH(%) согласно [2] по результатам испытаний метода ААНИИ для арктических морей и системы Гидрометцентра России для Азовского, Черного и Каспийского морей

Период прогноза	Метод ААНИИ по результатам испытаний за 01.2008–07.2010 г.	Система Гидрометцентра России по результатам испытаний за 04–11.2011 г.
на 24 ч	71	87,3–94,6
на 48 ч	70	83,3–93,5
на 72 ч	68	81,3–90,0

Выводы и рекомендации о внедрении

- В Гидрометцентре России разработана автоматизированная система прогнозирования характеристик ветрового волнения для акваторий Азовского, Черного и Каспийского морей.
- Система обеспечивает прогнозирование характеристик ветрового волнения (SWH, среднего направления распространения, средней длины, среднего периода, высоты и направления распространения ветровых волн, высоты и направления распространения волн зыби) на сроки до 5 суток.

- Проведены испытания прогностической системы в период 15.04 –30.11 2011 г. Оценка качества прогнозов осуществлялась на основе сопоставления с данными спутниковых измерений SWH из базы RADS.

- Оправдываемость прогнозов SWH в указанный период составила для этих трех морей 87,3–94,6 % (коэффициент корреляции 0,80–0,85) на первые сутки, 83,3–93,5 % (коэффициент корреляции 0,80–0,85) на вторые сутки, 81,3–90,0 % (коэффициент корреляции 0,70–0,80) на третьи сутки, 76,4 – 84,9 % (коэффициент корреляции 0,59–0,77) на четвертые сутки и 71,6 – 81,1 % (коэффициент корреляции 0,48–0,69) на пятые сутки.

- Ухудшение качества прогнозов с увеличением заблаговременности в значительной мере определяется снижением точности прогнозов ветра. Это подтверждается стабильным увеличением корреляции ошибок прогнозов SWH и ветра. Таким образом, можно ожидать повышение оправдываемости прогнозов SWH с улучшением прогнозов скорости ветра.

- Показатели качества прогнозов в терминах среднеквадратичной ошибки и коэффициента корреляции сопоставимы с таковыми для известных по литературным источникам зарубежных систем.

- Показатели качества прогнозов в терминах оправдываемости (как она определяется в [2]) превосходят таковые для отечественных систем, аналогичных по способу составления прогнозов.

В соответствии с решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета от 27 марта 2012 г. разработанная оперативная технология прогнозирования характеристик ветрового волнения для акваторий Азовского, Черного и Каспийского морей рекомендована для оперативного использования в ФГБУ «Гидрометцентр России» в качестве основного метода.

Список литературы

1. Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А. Система COSMO-RU негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: первый этап реализации и развития // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 8. – С. 5–20.
2. РД 52.27.759–2011. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3, часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. – М.: Триада, лтд, 2011. – 201 с.
3. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Багров А.Н., Блинов Д.В. Мезомасштабная модель COSMO-RU07 и результаты ее оперативных испытаний // Информационный сборник № 39. – 2011. – С. 15–48.

4. Толстых М.А. Полулагранжева модель атмосферы с высоким разрешением для численного прогноза погоды // Метеорология и гидрология. – 2001. – № 4. – С. 5–16.

5. Толстых М.А., Будковский Г.С. Усовершенствованный вариант глобальной полулагранжевой модели прогноза полей метеозлементов в версии с постоянным разрешением заблаговременностью до 10 суток (автор – М.А. Толстых; Гидрометцентр РФ, Институт вычислительной математики РАН) и результаты его оперативных испытаний // Информационный сборник № 34. – 2007. – С. 24–48.

6. Толстых М.А., Горлач И.А., Багров А.Н., Веселова Г.К., Малинская Г.В., Шаколько Е.Н. Прогноз осадков по регионам внетропической зоны Северного полушария на срок до 72 часов на основе полулагранжевой модели атмосферы с постоянным разрешением ПЛАВ-2005 (авторы – М.А. Толстых, А.В. Шляева) и результаты его оперативных испытаний по регионам России // Информационный сборник № 36. – 2008. – С. 4–42.

7. Abdalla S., Janssen P.A.E.M., Bidlot J.R. Jason-2 Wind and Wave Products: Random Error Estimation // ECMWF Technical Memorandum. – 2010. – No. 639. – 13 p.

8. Chu P.C., Qi Y., Chen Y., Shi P., Mao Q. South China Sea Wind-Wave Characteristics. Part I: Validation of Wavewatch-III Using TOPEX/Poseidon Data // J. Atm. Ocean. Tech. – 2004. – Vol. 21. – P. 1718–1733.

9. Da Rocha R.P., Sugahara S., Da Silveira R.B. Sea Waves Generated by Extratropical Cyclones in the South Atlantic Ocean: Hindcast and Validation against Altimeter Data // Weather and forecasting. – 2003. – Vol. 19. – P. 398–410.

10. Janssen P., Hansen B., Bidlot J.-R.. Verification of the ECMWF Wave Forecasting System against Buoy and Altimeter Data // Weather and forecasting. – 1997. – Vol. 12. – P. 763–784.

11. Li J.-G., Holt M. Validation of a regional wave model with envisat and buoy observations // Proc. ‘Envisat Symposium 2007’, Montreux, Switzerland 23–27 April 2007 (ESA SP-636, July 2007).

12. Naeije M., Scharroo R., Doornbos E., Schrama E. Global Altimetry Sea-level Service: GLASS. NIVR/SRON GO project: GO 52320 DEO, 2008. – 107 p.

13. Picot N., Case K., Desai S., Vincent P. AVISO and PODAAC User Handbook. IGDR and GDR Jason Products // SMM-MU-M5-OP-13184-CN (AVISO), JPL D-21352 (PODAAC), 2003. – 107 p.

14. Silva F. S., Pinto J. P., Almeida S. Operational Wave Forecasting System for the Portuguese Coast // Journal of Coastal Research. – 2009. – SI 56 (Proceedings of the 10th International Coastal Symposium). – P. 1055–1059.

15. Sølvsteen C., Hansen Carsten. Validation of the operational wave models WAVEWATCH-III and Mike21-OSW against satellite altimetry and coastal buoys, 2006.

16. Tolman H.L. User manual and system documentation of WaveWatch III version 3.14. NOAA /NWS/NCEP / MMAB Technical Note 276, 194 pp + Appendices. – 2009. – (<http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/>).

17. Ward R. General Bathymetric Charts of the Ocean // Hydro International. – 2010. – Vol. 14, No. 5.

18. Wessel P., Smith W.H.F. A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database // J. Geophys. Res. – 1996. – Vol. 101(B4). – P. 8741–8743.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МЕТОД ПРОГНОЗА СРЕДНЕЙ МЕСЯЧНОЙ ЛЕДОВИТОСТИ ОХОТСКОГО, ЯПОНСКОГО И БЕРИНГОВА МОРЕЙ С ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТЬЮ ДО ОДНОГО ГОДА

В Приморском УГМС, в соответствии с «Планом испытания и внедрения новых и усовершенствованных методов (технологий) гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов Росгидромета», в период с июня 2008 по июнь 2011 г. проводились оперативные испытания автоматизированного метода прогноза средней месячной ледовитости Охотского, Японского и Берингова морей с заблаговременностью более 7 месяцев. Этот метод разработан в отделе долгосрочных прогнозов погоды и изучения климата ФГБУ «ДВНИГМИ» в период с 2005 по 2008 год.

Ледовитость моря рассчитывалась как отношение общей площади льда к площади расчетной сетки на акватории моря, выраженное в процентах. Расчетная сетка, определяющая границы возможного формирования ледового покрова, занимает в Охотском и Беринговом морях всю акваторию, в Японском море – Татарский пролив, залив Петра Великого и прибрежную зону Российской Федерации [3–5].

Прогнозы рассчитывались на месяцы с наиболее устойчивым ледовым покровом: в Охотском и Беринговом морях – с декабря по май, в Японском море – с декабря по апрель.

Исходные данные и основы метода прогноза

Современные способы прогноза ледовых характеристик основываются на представлении о взаимодействии океана, ледового покрова и атмосферы как единой системы с множеством прямых и обратных связей. Особое внимание при долгосрочном прогнозировании уделяется наличию в атмосфере «дальних связей» (в пространстве и времени). Поэтому при проведении исследований исходные данные полей метеопараметров выбирались в Северном полушарии, а также привлекалась информация из Южного полушария. При выборе полей руководствовались тем, чтобы метеопараметры, характеризующие термодинамические процессы в атмосфере, не только достаточно полно отражали ледовые условия на морях, но и могли использоваться для их предсказания. Термические характеристики воздуха опосредованно могут служить количественными показателями теплосодержания океана.

Таким образом, при разработке метода долгосрочного прогноза ледовитости дальневосточных морей использовался следующий набор исходных данных полей метеопараметров: геопотенциал на уровне 500 гПа; давление, приведенное к уровню моря; температура воздуха на изобарической поверхности 850 гПа; температура поверхности Земли; поле относительной топографии $OT_{500/1000}$, а также индекс SOI (стандартизованная разность значений давления на станциях «Таити» и «Дарвин»); ледовитость моря.

Источником информации для получения упомянутых полей послужили 4-срочные архивы NCEP/NCAR в формате GRIB на сетке $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ (http://nomad2.ncep.noaa.gov/cgi-bin/ftp2u_6p_r1.sh). По этим данным проводилось осреднение и расчет среднемесячных значений в узлах сетки. Значения SOI, интегральной характеристики Южного колебания, получены из (<ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd52dg/data/indices/>).

Архивы по ледовитости моря сформированы с привлечением:

- данных декадной и среднемесячной ледовитости по сведениям ледовых авиаразведок, содержащихся в архивах ФГБУ «ДВНИГМИ»;

- данных по модельной сплочённости льда NCEP в формате GRIB (<ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/ice>) (разрешение сетки $1^\circ \times 1^\circ$ и $0,5^\circ \times 0,5^\circ$);

- Arctic Sea Ice Atlas Национального ледового центра США (NIC) в формате EASE-Grid (<http://nsidc.org>).

В результате обработки упомянутой информации получены поля сплочённости льда разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$.

Климатические значения (нормы) и средние квадратические отклонения (σ) от нормы для всех параметров рассчитаны для каждого месяца по 30-летнему базовому периоду, рекомендованному ВМО (1971–2000 гг.). Норма и σ для SOI определены по базовому периоду 1951–1980 гг.

Объем выборки изменялся в зависимости от срока составления прогноза. Для проведения расчетов значения предикторов приводились к стандартному виду.

Описание прогностического алгоритма

Метод долгосрочного прогноза ледовитости дальневосточных морей базируется на модели, разработанной на физико-статистической основе. Описание алгоритма построения прогностической модели на месяцы ледового сезона представлено в [1, 2, 10]. Его основные составляющие следующие:

- поиск и формирование рядов предикторов;
- расчет будущих значений предиктанта;

– отбор прогностической модели и выдача результатов прогноза.

Поиск и формирование рядов предикторов. Для поиска предикторов используется способ их выявления в полях гидрометеопараметров, изложенный в [6]. Предлагается следующая последовательность действий для диагностики статистических связей между предиктантом и множеством предикторов:

- 1) разбиение выборки предиктанта на три класса;
- 2) отнесение элементов выборки предиктора к соответствующему классу предиктанта;
- 3) выявление в определенном классе статистических взаимосвязей между предиктантом и предиктором и нахождение степени различия между полученными классами.

Следуя [6], метод поиска предикторов в полях гидрометеопараметров, применительно к прогнозу средней месячной ледовитости моря (предиктант), состоит в следующем. Многолетний ряд отклонений ледовитости от нормы (анЛ) для данного месяца делится на три группы случаев: меньше нормы ($\text{анЛ} < -0,674\sigma$), больше нормы ($\text{анЛ} > 0,674\sigma$) и близкие к норме ($|\text{анЛ}| \leq 0,674\sigma$). Каждому расчетному классу ледовитости ставится в соответствие набор предикторов. В качестве потенциальных предикторов выступают значения гидрометеопараметров в узлах сетки на пространстве Северного полушария. Поля выбираются в предшествующие прогнозу месяцы. Далее этот набор предикторов анализируется на степень информативности. Для определения уровня информативности принималось следующее правило: соответствие между значениями ледовитости и предиктора тем больше, чем выше межклассовые различия и чем более устойчивы выбранные классы.

Для упрощения диагностики массивов ледовитости и полей гидрометеопараметров используется процедура определения однородности классов по знаку аномалии предиктора.

Для этого рассчитывается величина $P_i = 100 \frac{n_{i+}}{N_i}$, где n_{i+} – число случаев в i -й точке (узле сетки) с положительной аномалией; N_i – общее число случаев, вошедших в данный класс. Если $P_i \geq 60 \%$, то преобладают положительные аномалии предиктора, если $P_i \leq 40 \%$ – отрицательные. Выделяются «прямые» и «обратные» связи предиктанта с предиктором.

Связь названа:

– «прямая», если большой повторяемости положительного знака аномалии предиктора в классе ледовитости «больше нормы» соответствует большая повторяемость отрицательного знака аномалий предиктора в классе ледовитости «меньше нормы»;

– «обратная», если большой повторяемости отрицательного знака аномалий предиктора в классе ледовитости «больше нормы» соответствует большая повторяемость положительного знака в классе ледовитости «меньше нормы».

Наиболее полезную для прогнозов информацию содержат те узлы поля гидрометеопараметра, в которых отмечаются наибольшие значения расстояний между классами.

Если в набор исходных данных входят одновременно несколько полей, то информативными могут оказаться десятки предикторов. Поэтому разработан алгоритм осреднения значений предикторов по районам. В район может быть включено два и более близлежащих информативных предиктора.

В алгоритме применен динамический принцип формирования рядов предикторов. Это позволяет использовать разнородную информацию, задаваемую как в виде полей, так и в виде временных рядов. Такие предикторы, как ледовитость моря и индекс SOI, представлены временными рядами.

Расчет будущих значений ледовитости. Прогностические значения ледовитости в модели могут быть получены двумя способами:

- в результате составления и решения уравнения множественной линейной регрессии (метод регрессионный);
- путем выявления лет-аналогов по предикторам и расчета ледовитости по некоторому правилу.

Использование аналогов позволяет, хотя и опосредованно, более полно учесть местные условия рассматриваемой акватории. Степень аналогии атмосферных процессов устанавливается следующим образом. В исходном для прогноза месяце (определяемом заблаговременностью прогноза) рассчитываются аномалии всех предикторов (исходная реализация). Затем оценивается мера различия между исходной реализацией и реализациями из архивов в этом же месяце. В качестве метрики использовано евклидово расстояние, которое рассчитывается по совокупности предикторов. Выбирается группа лет-аналогов с высокой степенью сходства с исходной реализацией (по минимуму метрики). Осредненное по отобранной группе аналогов значение предиктанта предлагается в качестве прогностического. В свою очередь, метод аналогов использовался в двух вариантах, отличающихся набором предикторов, по которым аналог находится. В первом варианте в анализ включались все предикторы («метод аналоговый»), во втором – только те, которые входили в построенное ранее уравнение регрессии («метод регрессионно-аналоговый»).

Отбор прогностической модели. Для создания метода долгосрочного прогноза ледовитости требовалось построить прогностическую модель, наиболее адекватно отражающую ледовую обстановку в море. Для этого проводились вычислительные эксперименты по разным наборам данных (использовались сочетания всех перечисленных выше гидрометеопараметров), разным заблаговременностям (исследовались асинхронные связи со сдвигом в 7 месяцев и более) и разным способам расчета значений ледовитости. В экспериментах применялась адаптивная (с добавлением в архивы исходных данных, используемых для осуществления прогноза) схема расчетов.

Расчет оценок производился согласно Наставлению [9] и Методическим указаниям [8].

Качество прогностической модели оценивалось по значению оправдываемости прогнозов (Р, %). Оценка осуществлялась на материалах семилетней проверочной выборки (2001/2002 – 2007/2008 гг.). Варианты моделей отбирались (в режиме визуального просмотра результатов оценки) исходя из максимальной оправдываемости прогнозов.

Единой физико-статистической прогностической модели для всех месяцев ледового сезона на акватории конкретного моря создать не удалось. Вычислительные эксперименты показали, что для каждого месяца выявляется несколько вариантов модели с оправдываемостью прогнозов ледовитости на независимой выборке не менее 70 %.

Первоначально предпочтение отдавалось тем из прогностических моделей, которые при одинаковом качестве прогноза ледовитости требовали минимальных трудозатрат при подготовке исходной информации. Для проведения оперативных испытаний для Охотского и Японского морей были отобраны модели, где в число исходных данных входили: ледовитость моря, индекс SOI, поля геопотенциала на уровне 500 гПа и давления на уровне моря. Но одновременно испытывались модели, где помимо предикторов барических полей использовались предикторы термических полей: температуры воздуха на уровне 850 гПа, относительной топографии $OT_{500/1000}$, температуры поверхности Земли. В дальнейшем изложении метод расчета прогностических значений ледовитости по первому набору моделей будем называть мет1, а по второму – мет2. При этом заблаговременность прогнозов в наборе моделей мет2 больше, чем в мет1. Для Берингова моря в обоих наборах использовались указанные выше термобарические поля.

Технологическая линия

Технологическая линия (рис. 1) оперативного прогноза ледовитости включает следующие блоки:

- формирование баз данных 4-х срочных метеорологических наблюдений и данных по сплочённости льда;

- обработка оперативных архивов и создание наборов среднемесячных величин, используемых для расчетов;
- прогностический блок, включающий выдачу результатов прогноза.

Первый блок функционирует в едином комплексе уже действующих моделей и технологий оперативных морских прогнозов. Второй блок технологической линии дополнительно подключен в систему первого и является общим для трех морей. Третий блок подготовлен для каждого из морей в отдельности.

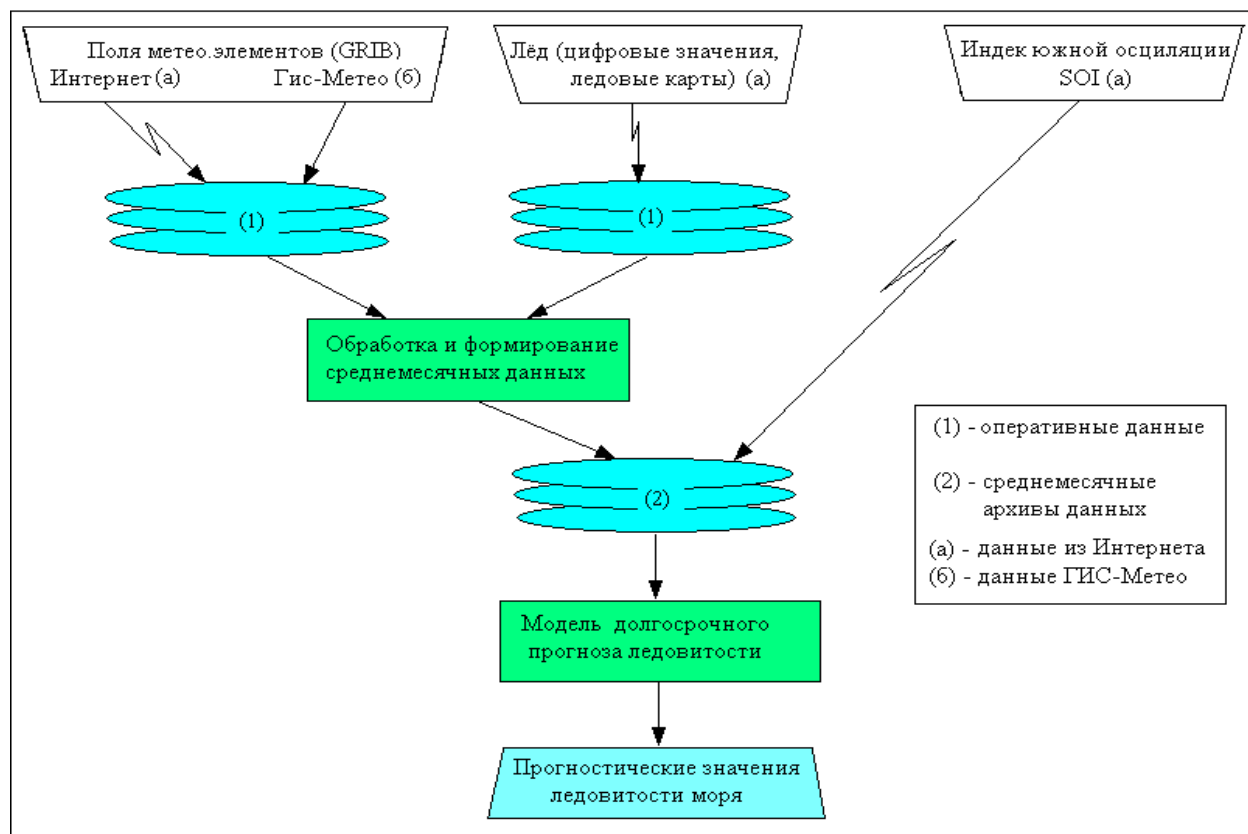


Рис. 1. Общая схема линии долгосрочного прогноза ледовитости моря.

Программный комплекс, реализующий прогностический блок, содержит архивы перечисленных выше полей метеопараметров, архивы средних месячных значений этих полей и их стандартных отклонений, файлы с данными ледовитости и индекса SOI, а также блок расчета будущих значений ледовитости моря.

Входным параметром служит год прогноза, определяемый по году начала ледового сезона (декабрь). Результатом расчетов являются прогностические значения ледовитости моря.

Результаты испытаний прогнозов ледовитости и сравнение их с результатами прогнозов другими методами

Сравнение результатов прогнозов предложенным методом и другими методами вызывает определенные трудности.

Несмотря на то, что методы прогноза ледовых условий на дальневосточных морях разрабатываются в ФГБУ «ДВНИГМИ» с конца 70-х годов прошлого века [7], к сожалению, в оперативной практике они активно не используются из-за недостаточной автоматизации процесса подготовки прогноза.

В настоящее время ежегодно составляются официальные прогнозы ледовых условий для неарктических морей России, в том числе для дальневосточных морей. Они помещаются в Гидрометеорологический бюллетень ФГБУ «Гидрометцентр России». Однако провести корректное сравнение методических и официальных прогнозов не представляется возможным, поскольку в официальных прогнозах ледовитости указываются две ее характеристики: наибольшее значение ледовитости за месяц и ледовитость во 2-ой декаде, а в методических – только средняя за месяц величина.

Тем не менее, для примера было проведено качественное сравнение представленных в бюллетене и методических прогнозов средней месячной ледовитости на акватории Охотского моря за два ледовых сезона: 2008/2009–2009/2010 гг. (табл. 1). Для этого из методических прогнозов ледовитости на все месяцы ледового сезона отобран месяц с максимальной ледовитостью. В табл. 1 также помещены значения максимальной за сезон фактической средней месячной ледовитости, многолетней средней величины ледовитости, взятой из Бюллетеня (числитель), и рассчитанной авторами метода по данным за период 1971–2000 гг. (знаменатель).

Месяц наибольшей ледовитости в ледовый сезон 2008/2009 гг. во всех прогнозах спрогнозирован верно, но величина ледовитости завышена значительно. Прогноз можно считать неудачным по всем методам. Успешными как по месяцу максимальной ледовитости, так и по ее величине, оказались прогнозы максимальной ледовитости на сезон 2009/2010 гг. Таким образом, результаты методических прогнозов ледовитости на зиму можно считать сопоставимыми с официальными прогнозами. При этом методические прогнозы даются с большей заблаговременностью.

Количественное же сравнение проводилось только между методическим и стандартным (климатологическим) прогнозами.

Осредненные за три года оперативных испытаний оправдываемости методических (мет1, мет2) и климатологических (клим) прогнозов по каждому из дальневосточных морей и каждому месяцу ледового сезона приведены в табл. 2.

Таблица 1

Долгосрочный прогноз (официальный, методический, климатологический) максимальной ледовитости (махЛ, %) Охотского моря, ледовые сезоны 2008/2009–2009/2010 гг.

Способ прогноза	Прогноз			Факт	
	дата составления	махЛ	месяц махЛ	махЛ	месяц махЛ
Период прогноза 2008/2009 гг.					
Официальный	30.09.2008	70-80	III	57	III
Методический	06.2008	82	III	57	III
Климатологический		78/75	III	57	III
Период прогноза 2009/2010 гг.					
Официальный	03.10.2009	70-80	III	74	III
Методический	06.2009	71	III	74	III
Климатологический		75/75	III	74	III

Таблица 2

Средняя за период оперативных испытаний 2008/2009–2010/2011 гг. оправдываемость (Р%) методических (мет1, мет2) и климатологических (клим) прогнозов средней месячной ледовитости дальневосточных морей

Месяц прогноза	Охотское море			Японское море			Берингово море		
	клим	мет1	мет2	клим	мет1	мет2	клим	мет1	мет2
Декабрь	33,3	100	100	100	100	100	66,7	33,3	100
Январь	0	33,3	100	0	100	100	0	100	66,7
Февраль	33,3	66,7	100	33,3	100	100	0	100	33,3
Март	33,3	66,7	66,7	66,7	100	100	66,7	33,3	66,7
Апрель	66,7	33,3	66,7	100	100	66,7	33,3	33,3	66,7
Май	100	33,3	66,7	–	–	–	33,3	0	33,3

В Охотском море преимущество имеют прогнозы ледовитости по мет2, которые с декабря по февраль оправдались на 100 % и с марта по май – на 67 %. Из прогнозов ледовитости, осуществленных по мет1, самыми неудачными (Р=33 %) оказались прогнозы на январь, апрель и май, а самыми успешными (100 %) – на декабрь. Из общего числа прогнозов (18) по мет1 за период испытаний не оправдалось (Р = 0 %) 8 прогнозов, причем в пяти из них не предсказаны значительные (больше σ) аномалии ледовитости, а из прогнозов по мет2 не оправдались только три прогноза (2010 г., март–май).

В среднем за 3 года оправдываемость методических прогнозов ледовитости Японского моря по моделям как первого, так и второго наборов, оказалась успешной. Только в апреле

оправдываемость, в отличие от других месяцев ($P=100\%$), по мет2 составила 67 %. При этом все случаи (январь 2009, 2010 и 2011 г., февраль 2010 и 2011 г., март 2009 г.) аномалии ледовитости больше σ предсказаны.

Прогнозы ледовитости по акватории Берингова моря оказались менее успешными. Самыми неудачными одновременно по мет1 и мет2 были прогнозы на май (0 и 33 % соответственно). Однако из 12 аномалий ледовитости, превосходящих по величине σ , только три аномалии (больше $1,5\sigma$) не были предсказаны в прогнозах ни по одной из двух моделей.

Оценки климатологических прогнозов свидетельствуют о том, что оперативные испытания методов прогноза среднемесячной ледовитости дальневосточных морей проходили в сезоны, отличавшиеся аномальным развитием ледовых условий. Кроме того следует отметить, что климатологические прогнозы средней месячной ледовитости последнего месяца периода ледовитости Охотского и Японского морей точнее методических.

Для иллюстрации сказанного на рис. 2 приведен график стандартизованных значений фактических среднемесячных аномалий ледовитости дальневосточных морей за период оперативных испытаний (2008/2009 – 2010/2011 гг.).

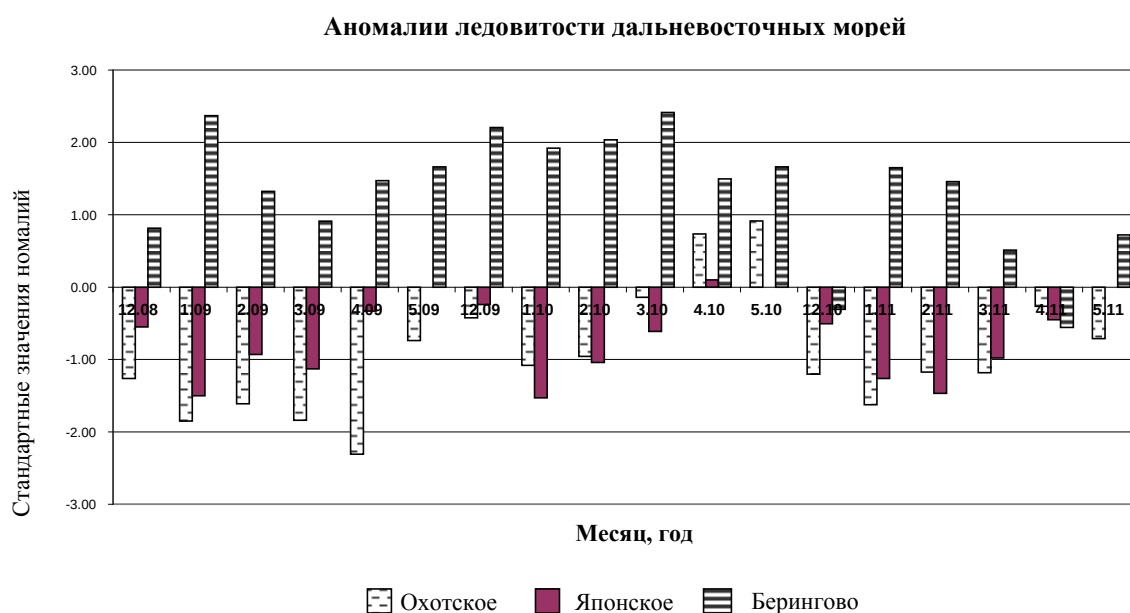


Рис. 2. Фактические аномалии ледовитости Охотского, Японского и Берингова морей за период 2008/2009-2010/2011 гг.

Сезон 2008/2009 гг. характеризовался значительными аномалиями ледовитости на акваториях всех дальневосточных морей. В Охотском и Японском морях они были меньше нормы, а в Беринговом – больше нормы. При этом в Охотском море только в мае аномалии

составили $0,7\sigma$, а от декабря к апрелю они изменялись от $1,3\sigma$ до $2,3\sigma$. В апреле 2009 г. почти на 7 % был уменьшен абсолютный минимум ледовитости 2005 г., составлявший 37 %. Аномалии ледовитости в Японском море были меньше по величине. Положительные аномалии ледовитости, наблюдавшиеся в Беринговом море, в декабре и марте были близки к σ , а в остальные месяцы – больше σ .

В сезоне 2009/2010 гг. в Охотском и Японском морях в первые четыре месяца также отмечались отрицательные аномалии ледовитости, но в апреле знак аномалии изменился на противоположный. В мае на акватории Охотского моря величина положительной аномалии составила $0,92\sigma$. В Беринговом море в течение ледового сезона отмечались положительные аномалии, превышающие $1,5\sigma$.

В сезон 2010/2011 гг. на всех трех морях также наблюдались аномалии ледовитости, превышающие σ . В Охотском море такие аномалии прослеживались с декабря по март, а в Японском и Беринговом морях – с января по февраль.

Для более детального анализа оправдываемости прогнозов по каждому из трех сезонов обратимся к наиболее часто употребляемому показателю качества прогнозов [7]: $|\Delta L| = |P - F|$ – абсолютная ошибка прогноза, где P (F) – прогностическое (фактическое) значение ледовитости. Полученные результаты оценки прогнозов представлены в табл. 3, где ΔL_k , ΔL_1 и ΔL_2 обозначают абсолютные ошибки климатологического и методических (мет1, мет2) прогнозов соответственно. Для удобства анализа приводится абсолютная величина допустимой ошибки прогнозов. Для прогнозов заблаговременностью более 6 месяцев допустимая погрешность составляет $\pm\sigma$ (σ – среднеквадратическое отклонение от нормы среднемесячной ледовитости).

По акватории Охотского моря максимально большие абсолютные ошибки климатологических прогнозов ледовитости, осредненные за 3-летний период испытаний, наблюдались в январе ($1,5\sigma$), а минимальные – в мае ($0,8\sigma$). В декабре значение ΔL_k составило $0,96\sigma$, а с февраля по апрель превысило σ . Средние же абсолютные ошибки методических прогнозов, превышающие σ , отмечались по обеим моделям (мет1 – $1,42\sigma$, а мет2 – $1,16\sigma$) только в апреле, а в феврале - в прогнозах по модели из первого набора ($1,04\sigma$). При сравнении результатов прогноза по двум наборам моделей очевидное преимущество с января по май имеют прогностические модели из второго набора. В декабре же ошибки прогнозов по модели из первого набора меньше.

В Японском море как по оправдываемости, так и по величине абсолютной ошибки прогноза только в апреле предпочтение следует отдать модели из первого набора. В остальные месяцы прогнозы находятся на одном уровне по величине оправдываемости (100 %) и несущественно отличаются по абсолютной ошибке. При этом значения ΔL_k с

января по март больше $\Delta L1$ и $\Delta L2$ в 3–4 раза. В декабре абсолютные ошибки климатологического и методического (по мет1) прогнозов близки по величине.

Осредненные за 3 года абсолютные ошибки климатологических прогнозов ледовитости по акватории Берингова моря в каждом из шести месяцев ледового сезона были больше величины среднего квадратического отклонения для этих месяцев. Максимальная величина ΔL_k наблюдалась в январе ($1,98\sigma$), а минимальная ($1,09\sigma$) – в апреле. В прогнозах лучшей по качеству модели для каждого месяца величина абсолютной ошибки была меньше абсолютной ошибки климатологического прогноза. При этом только в мае абсолютная ошибка методического прогноза (по мет2) составила $1,21\sigma$, а в остальные месяцы она была меньше или близка к σ .

Таблица 3

Допустимая (σ) и абсолютная ошибки (%) методических (мет1- $\Delta L1$, мет2- $\Delta L2$) и климатологического (ΔL_k) прогнозов ледовитости Охотского, Японского и Берингова морей на месяцы ледовых сезонов за период оперативных испытаний 2008/2009–2010/2011 гг.

Месяц	σ	Период оценки											
		2008/2009			2009/2010			2010/2011			2008/2009—2010/2011		
		ΔЛк	ΔЛ1	ΔЛ2	ΔЛк	ΔЛ1	ΔЛ2	ΔЛк	ΔЛ1	ΔЛ2	ΔЛк	ΔЛ1	ΔЛ2
Охотское море													
ХП	8,49	10,7	3,4	7,5	3,6	4,8	4,3	10,2	0	3,8	8,17	2,73	5,2
I	11,4	21,1	12	10,9	12,3	1,2	2,6	18,5	20,6	8,2	17,3	11,27	7,23
II	11,42	18,4	23,4	0,6	10,9	6,8	1,6	13,4	5,3	3,6	14,23	11,83	1,93
III	9,9	18,2	25,2	0,9	1,4	3,0	13,1	11,7	0,6	0,9	10,43	9,6	4,97
IV	11,7	27,0	14,7	11,4	8,6	27,2	19,8	3,1	7,8	9,7	12,9	16,57	13,63
V	8,3	6,1	10,2	0,2	7,6	11,3	15,1	5,9	1,9	1,5	6,53	7,8	5,6
Японское море													
ХП	6,7	3,7	2,1	0,1	1,6	5,0	1,1	3,4	2,5	1,5	2,9	3,2	0,9
I	8,8	13,2	7,1	6,3	13,4	1,8	4,9	11,1	1,0	1,7	12,57	3,3	4,3
II	9,0	8,4	1,3	5,2	9,4	1,4	1,2	11,4	5,2	0,7	9,73	2,63	2,37
III	9,2	10,4	3,7	1,9	5,6	2,1	5,5	9,0	1,6	0,7	8,33	2,47	2,7
IV	4,9	1,6	1,5	0,8	0,5	2,2	4,9	2,2	4,7	11,2	1,43	2,8	5,63
Берингово море													
ХП	5,53	4,5	4,1	0,7	12,2	8,1	4,8	1,7	8,4	4,8	6,13	6,87	3,43
I	5,99	14,2	5,8	4,3	11,5	5,3	0,2	9,9	5,7	7,4	11,87	5,6	3,97
II	5,21	6,9	2,2	2,5	10,6	4,0	7,0	7,6	2,7	6,8	8,37	2,97	5,43
III	5,47	5,0	3,5	4,5	13,2	10,8	10,5	2,8	6,4	2,1	7,0	6,9	5,7
IV	8,09	11,9	7,9	7,0	12,1	10,9	15,4	4,5	9,5	2,1	8,83	9,43	8,17
V	7,76	12,9	16,2	9,9	12,9	9,4	6,5	5,6	8,5	11,8	10,47	11,37	9,4

Сравнительный анализ оценок климатологических (клим) и методических (мет1 и мет2) прогнозов указывает на эффективность использования методических прогнозов ледовитости. Приведенные в табл. 4 осредненные за периоды авторских и оперативных испытаний характеристики качества прогнозов подтверждают это.

Таблица 4

**Результаты испытаний метода долгосрочного прогноза средней месячной ледовитости
дальневосточных морей за месяцы ледового сезона в периоды авторских (2001/02–2007/08 гг.) и
оперативных (2008/2009–2010/2011 гг.) испытаний**

Море	Период оценки, гг.	Кол-во составлен. прогнозов	Число оправдавшихся прогнозов			Оправдываемость, %		
			клим	мет1	мет2	клим	мет1	мет2
Охотское	2001/02-2007/08	42	24	37	40	57	88	95
	2008/09-2010/11	18	8	10	15	44	56	83
Японское	2001/02-2007/08	35	15	30	30	43	86	86
	2008/09-2010/11	15	9	15	14	60	100	93
Берингово	2001/02-2007/08	42	29	37	36	69	88	86
	2008/09-2010/11	18	6	9	11	33	50	61

Число оправдавшихся методических прогнозов, как в период авторских испытаний, так и за годы оперативных испытаний, превосходит количество оправдавшихся климатологических прогнозов.

Величина оправдываемости методических прогнозов на акваториях дальневосточных морей, рассчитанная по семилетней независимой выборке, изменялась от 86 до 95 %, а климатологических – от 33 до 69 %. Трехлетние оперативные испытания в целом подтвердили выводы, сделанные на основе авторских испытаний. Хотя оправдываемость прогнозов ледовитости на акваториях Охотского и Берингова морей понизилась в период оперативных испытаний, но их преимущество по отношению к климатологическим прогнозам остается очевидным. Эффективность прогнозов значительно понизилась только при использовании мет1 в Охотском море (с 31 до 12 %). В Японском море она уменьшилась с 43 до 33 % в случае использования мет2 и до 40 % – мет1. В Беринговом море за годы оперативных испытаний при использовании мет2 оправдываемость прогнозов уменьшилась, но их эффективность увеличилась с 17 до 28 %.

Для характеристики надежности прогнозов была рассчитана мера мастерства по формуле [8]:

$$S = \frac{U - U_0}{U_u - U_0},$$

где U и U_0 – любые из показателей успешности методических и климатологического прогнозов; U_u – успешность идеального прогноза. Для идеальных прогнозов мера мастерства $S = 1$, при $S = 0$ качество методического прогноза находится на уровне стандартного и при $S < 0$ – ниже стандартного прогноза. Эта характеристика рассчитана для средней за 3 года абсолютной ошибки прогноза. В случае идеального прогноза $|\Delta L| = 0$.

Анализ значений меры надежности S (табл. 5) показывает, что отрицательной одновременно для моделей из первого и второго наборов эта характеристика оказалась только в апреле для прогнозов ледовитости по Охотскому и Японскому морям. При этом в Охотском море фактическая аномалия, не превосходящая σ , была неудачно предсказана по обоим моделям в 2010 г. В Японском море не оправдался только прогноз на апрель 2011 г. по мет2. Однако средние за 3-летие абсолютные ошибки методического прогноза на апрель оказались больше аналогичных ошибок климатологического прогноза.

Таблица 5

Характеристика надежности (S) методических (мет1, мет2) прогнозов средней месячной ледовитости дальневосточных морей, рассчитанная по средней абсолютной ошибке прогнозов за период оперативных испытаний 2008/2009–2010/2011 гг.

Море	Вариант расчетов	Месяц					
		Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май
Охотское	мет1	0,666	0,349	0,169	0,167	–0,284	–0,194
	мет2	0,364	0,582	0,864	0,523	–0,057	0,142
Японское	мет1	–0,103	0,737	0,730	0,704	–0,958	–
	мет2	0,690	0,658	0,756	0,676	–2,937	–
Берингово	мет1	–0,121	0,528	0,646	0,014	–0,068	–0,086
	мет2	0,440	0,666	0,351	0,186	0,075	0,102

На основании результатов оперативных испытаний для долгосрочного прогноза ледовитости на дальневосточных морях были сформированы комбинированные наборы моделей с наиболее высокими оценками качества прогнозов. Оправдываемость прогнозов по комбинированному набору моделей за период оперативных испытаний приведена в табл. 6. Средняя за сезон оправдываемость прогнозов по этим наборам моделей за период испытаний превзошла 77 %. Эффективность прогнозов для Охотского моря составила 39 %, для Японского моря – 40 %, для Берингова моря – 44 %.

Таблица 6

Средняя оправдываемость (%) прогнозов средней месячной ледовитости Охотского, Японского и Берингова морей (комбинированный набор моделей) за 3-летний период (2008/2009–2010/2011 гг.)

Море	Оправдываемость, %						
	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Средняя за сезон
Охотское	100	100	100	66,7	66,7	66,7	83,3
Японское	100	100	100	100	100	–	100
Берингово	100	100	100	66,7	66,7	33,3	77,8

В дальнейшем по этим наборам можно осуществлять прогнозирование в оперативном режиме. Расчет значений средней месячной ледовитости на акваториях Охотского, Японского и Берингова морей в наступающем сезоне может быть произведен в июле. К этому времени должны быть подготовлены необходимые оперативные данные по июнь включительно.

На основании вышеизложенного можно заключить, что метод долгосрочного прогноза ледовитости имеет практическую значимость для оперативной практики прогнозирования на дальневосточных морях. Метод удобен в работе. Составление прогноза занимает несколько минут (без учета затрат времени на подготовку данных).

Рекомендации о внедрении

Центральная методическая комиссия по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета (ЦМКП) в своем решении от 6 февраля 2012 г. одобрила работу ФГБУ «ДВНИГМИ» по разработке автоматизированных методов прогноза средней месячной ледовитости дальневосточных морей. ЦМКП считает необходимым:

- внедрить метод прогноза средней месячной ледовитости Охотского, Японского и Берингова морей в оперативную практику ФГБУ «ДВНИГМИ»;
- рекомендовать прогностическим подразделениям Росгидромета, занимающимся обеспечением потребителей ледовой информацией, использовать выходную продукцию внедренного метода в практической работе.

Список литературы

1. Анжина Г.И., Вражский А.Н. Ансамблевый подход к долгосрочному прогнозу ледовитости Берингова моря с заблаговременностью более 6 месяцев // Труды ДВНИГМИ. Юбилейный выпуск «ДВНИГМИ - 60 лет». – 2010. – С. 145–157.
2. Анжина Г.И., Вражский А.Н. Ледовитость Японского моря и метод прогноза ее средних месячных значений с большой заблаговременностью // Труды ДВНИГМИ. Юбилейный выпуск «ДВНИГМИ – 60 лет». – 2010. – С. 134–144.
3. *Гидрометеорология* и гидрохимия морей. Том X. Берингово море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия. – СПб.: Гидрометеиздат, 1999. – 300 с.
4. *Гидрометеорология* и гидрохимия морей. Том IX. Охотское море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия. – СПб.: Гидрометеиздат, 1998. – 342 с.
5. *Гидрометеорология* и гидрохимия морей. Том VIII. Японское море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия. – СПб.: Гидрометеиздат, 2003. – 398 с.
6. Жежко Р.Я., Толмачева М.А. О способе выявления информативных предикторов // Труды ДВНИГМИ. – 1990. – Вып. 136. – С. 110–118.

7. *Плотников В.В.* Изменчивость ледовых условий дальневосточных морей России и их прогноз. – Владивосток: Дальнаука, 2002. – 172 с.
8. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиофизических прогнозов. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 150 с.
9. РД 52.27.759-2011. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Ч. III. Служба морских гидрологических прогнозов. – М.: Триада, лтд, 2011. – 201 с.
10. Anzhina G.I., Vrazhkin A.N. Long-term forecasting Method of the ice cover in the Okhotsk sea using physical-statistical model // Pacific oceanography. – 2008. – Vol. 4, No. 1–2. – P. 45–49.

МЕТОД ПРОГНОЗА СРОКОВ ОКОНЧАТЕЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ ПРИПАЯ В РАЙОНАХ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТЬЮ ДО ОДНОГО МЕСЯЦА

1. Общая характеристика припая

Припай моря Лаптевых является наиболее развитым в арктических морях сибирского шельфа и уступает по площади только припаю Восточно-Сибирского моря, при этом его площадь в период наибольшего развития в меньшей степени подвержена влиянию межгодовых колебаний гидрометеорологических условий, чем в Восточно-Сибирском и Карском морях.

Большая часть припайного льда образуется в восточной части моря Лаптевых (к востоку от 125° в.д.), его площадь составляет около 70 % от общей площади припая в море. Ширина припая вдоль Североземельского архипелага и Таймырского побережья в среднем не превышает 50 км. Около 85 % припая западной части моря (к западу от 125° в.д.) формируется вдоль южного побережья моря. Таким образом, в южной и юго-восточной части моря формируется более 90 % площади припая моря Лаптевых, что в среднем составляет около 200 тыс. км². Средняя и экстремальные границы припая в этом регионе моря представлены на рис. 1. Все межгодовые изменения в положениях границ припая в южной и восточной частях моря происходят в пределах 30-метровой изобаты.

2. Характеристика припая в период разрушения

Разрушению припая предшествует прекращение нарастания толщины льда и последующее за этим таяние ледяного покрова. За критерий сроков начала таяния ледяного покрова принимается время появления на поверхности ледяного покрова снежиц (0–1 балл по принятой 5-балльной шкале разрушенности). Благодаря радиационному теплу таяние льда начинается до перехода температуры воздуха через 0 °С к положительным значениям, поэтому первые признаки таяния появляются в среднем при устойчивом достижении

температурой воздуха отрицательных значений в пределах $-1,0 - -1,5$ °С, что наблюдается в первой декаде июня.

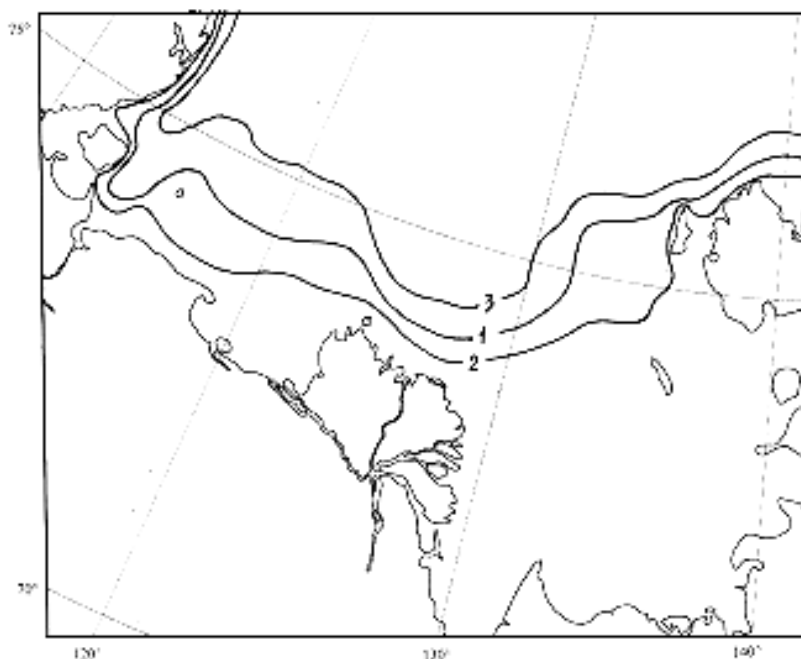


Рис. 1. Положение средней (1), минимальной (2) и максимальной (3) границ распространения припая в южной и восточной частях моря Лаптевых в период его максимального сезонного развития по данным ИСЗ.

Под воздействием тепловых и динамических факторов (ветер, приливоотливные колебания уровня) происходит взлом припая и его распадение на большие поля. Взлом припая начинается, как правило, при разрушенности ледяного покрова в 3–4 балла. Тепловые факторы приводят к уменьшению толщины припайного льда и ослабляют его прочность. Динамические факторы ускоряют разлом припая, и чем сильнее это воздействие, тем при большей толщине льда происходит разрушение припая. Окончательное разрушение припая чаще всего наблюдается при скорости ветра более 10 м/с, наиболее благоприятными направлениями ветра при этом являются отжимные. Дата, когда припай на всей видимой акватории моря взламывается, является датой окончательного взлома припая. При этом подошва припая во внимание не принимается.

Многолетний разброс сроков разрушения припая в районах моря Лаптевых колеблется в пределах 1–1,5 месяца.

На рис. 2 представлено среднее положение границ припая в период его разрушения (изохроны).

Частичный взлом припая в южной и восточной частях моря Лаптевых может произойти в начале июня. Окончательное разрушение припая происходит достаточно медленно вследствие морфометрических и ледовых особенностей юго-восточной части моря Лаптевых. Этот район характеризуется мелководьем, наличием банок, кроме того, в период

формирования припая на его границе образуются стамухи, которые с течением времени оказываются включенными внутрь припая и служат своеобразными якорями, удерживающими даже сильно разрушенные припай. В период проведения визуальных ледовых авиаразведок неоднократно наблюдался припай разрушенностью до 4 баллов (иногда до 5 баллов), который не распадался на отдельные поля. Окончательное разрушение такого припая происходило в течение 1–2 дней после выхода глубоких циклонов на акваторию моря и усилением ветра до 10–15 м/с.

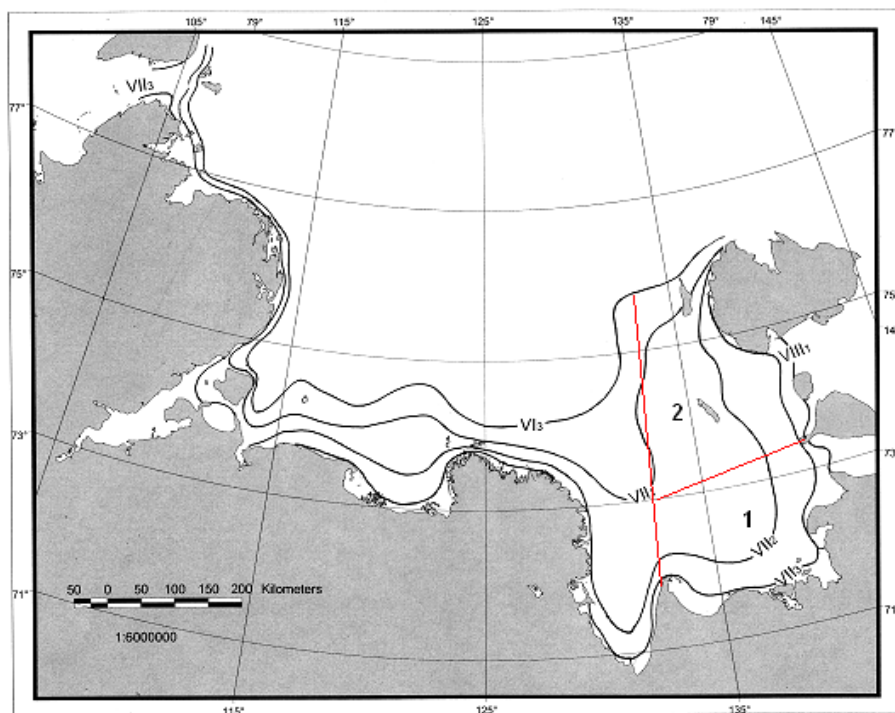


Рис. 2. Изохроны средних сроков разрушения припая в море Лаптевых по данным ИСЗ за 1980–2011 гг. Выделены районы подходов к проливам Дм. Лаптева (1), Санникова (2).

3. Разработка метода прогноза сроков окончательного разрушения припая в районах моря Лаптевых

Во всех известных способах прогноза сроков окончательного разрушения припая на физико-статистической основе [1, 2] в качестве предикторов используются различные гидрометеорологические характеристики, прямо или косвенно учитывающие влияние непосредственных факторов, обуславливающих разрушение припая.

Следует заметить, что в связи со значительным уменьшением (почти вдвое) сети полярных станций (береговых и островных) и сокращением наблюдательных программ на действующих станциях ощущается недостаток данных, необходимых для разработки

методов прогнозов. В значительных по протяженности припайных районах отсутствуют данные по температуре воздуха, толщине льда и скорости его стаивания. В частности, прекратили существование все полярные станции в западной части моря Лаптевых.

С переходом на спутниковые данные утрачены наблюдения за такими характеристиками ледяного покрова, как торосистость, появление снежниц (характеризующих начало таяния льда), разрушенность, которые определялись в период визуальных ледовых авиационных разведок и использовались в качестве предикторов при прогнозах разрушения припая.

При регулярных в весенне-летний период визуальных авиационных наблюдениях (не реже чем через трое суток) срок разрушения припая (распад его на отдельные ледяные поля) в каком-либо районе открытой или прибрежной части моря определялся достаточно надежно. В настоящее время, когда ледовая карта на основе данных ИСЗ строится один раз в 7 суток, возникает неопределенность в определении сроков разрушения припая в районах моря.

В отсутствии утраченных характеристик состояния припайного льда в период таяния для прогноза сроков разрушения припая были предприняты попытки использовать в качестве предикторов данные о площади припая, его ширине на створах, о площади заприпайных полыней, полученные по данным ИСЗ, а также сведения о толщине льда на полярных станциях. Однако для взлома припая в море Лаптевых не все эти показатели оказались информативными.

Из всех гидрометеорологических характеристик наиболее значимой в качестве предиктора для прогноза сроков разрушения припая является температура воздуха. Сроки начала таяния, как уже упоминалось, близки к дате перехода температуры воздуха через значения $-1 - -1,5$ °C, которая в среднем наступает в первой декаде июня. Поэтому средняя июньская температура воздуха, а иногда и майская, оказались наиболее эффективными для прогноза сроков разрушения припая.

Наиболее важными в навигационном отношении на трассе Северного морского пути на участке моря Лаптевых являются районы подходов к проливам Дм. Лаптева и Санникова. Поэтому совершенствование метода прогноза сроков окончательного разрушения припая было сосредоточено для этих двух районов (рис. 2). Тем более что восточная часть моря в большей степени, чем западная, освещена данными наблюдений на полярных станциях.

3.1. Регрессионные методы

Для разработки метода использовались данные о сроках окончательного разрушения припая в районах подходов к проливам Дм. Лаптева и Санникова (рис. 2) за период 1980–2007

гг., охватывающий период регулярных наблюдений за развитием припая в арктических морях по данным ИСЗ. Характеристика этих данных представлена в табл. 1. Данные за период 2008–2011 гг. использованы для проверки метода на независимом материале.

Таблица 1

Статистические характеристики сроков окончательного взлома припая в районах подходов к проливам Дм. Лаптева (1) и Санникова (2) за период 1980–2007 гг.

Статистические характеристики сроков окончательного взлома припая	Район подходов к проливу Дм. Лаптева (1)	Район подходов к проливу Санникова (2)
Средние	16.07	20.07
Ранние	2.07	28.06
Поздние	15.08	15.08
Размах колебаний, сутки	45	48
σ , сутки	8,3	9,2
$0,8\sigma$, сутки	6,6	7,4
$0,674\sigma$, сутки	5,6	6,2

Использование температуры воздуха в качестве предиктора

Как уже упоминалось, наиболее значимой в качестве предиктора для прогноза сроков разрушения припая является температура воздуха. Действительно, связь сроков окончательного взлома припая, вычисленного по средней температуре июня на станциях «Тикси» и «Кигилях», со сроками взлома припая в районе на подходах к проливу Дм. Лаптева оценивается коэффициентом корреляции, равным $-0,73$. Таким же по значению коэффициентом корреляции оценивается связь сроков взлома припая в районе на подходах к проливу Санникова со сроками взлома припая, вычисленного по средней температуре станций «Кигилях» и «Котельный». Прогностические уравнения, построенные на основании этих связей, представлены в табл. 2. Эффективность этих уравнений составляет 16 и 13 % для первого и второго районов соответственно.

Таблица 2

Прогностические уравнения сроков взлома припая в районах подходов к проливам Дм. Лаптева (1) и Санникова (2) с использованием средней за июнь температуры воздуха на полярных станциях и их оценка

Район	Станции	Ряд, гг.	Расчетные уравнения	Обеспеченность, %		Эффект., %
				метод.	природ.	
1	Тикси-Кигилях	1980–2007	$D = 25,0 - 4,9T_{VI}$	85	69	16
2	Кигилях-Котельный	1980–2007	$D = 21,9 - 5,7T_{VI}$	78	65	13

Разработка прогностических уравнений с учетом температуры воздуха, площади припая и полыней в районе на подходах к проливу Санникова

Для разработки прогностического уравнения, помимо средней за июнь температуры воздуха, была предпринята попытка использовать в качестве предикторов площадь припая в восточной части моря Лаптевых (к востоку от 125° в.д.) за третью декаду июня и суммарную площадь Анабаро-Ленской и Западной Новосибирской полыней (рис. 3), а также за третью декаду июня. Попытка оказалась удачной для района подходов к проливу Санникова.



Рис. 3. Положение полыней в восточной части моря Лаптевых.

Уравнение для прогноза сроков (D) окончательного взлома припая на подходах к проливу Санникова с использованием предикторов табл. 3 имеет вид:

$$D = -5,29T + 0,19S - 0,004P - 2,20 \quad (D - \text{количество суток относительно даты 30.VI}).$$

Таблица 3

Характеристики предикторов для прогноза сроков окончательного взлома припая в районе подхода к проливу Санникова

Предикторы	Характеристики			Парные коэф. кор.
	средние	максим.	миним.	
Температура воздуха за июнь на п/с Кигилях (Т, °С)	0,3	2,8	-2,9	-0,71
Площадь припая в восточной части моря Лаптевых в третьей декаде июня (S, тыс. км ²)	135,38	155,04	53,52	0,54
Суммарная площадь полыней в третьей декаде июня (Р, тыс. км ²)	67,50	216,10	5,85	-0,59

Из сравнения данных табл. 2 и табл. 4 видно, что эффективность прогностического уравнения с использованием в качестве предикторов температуры, площадей припая и полыней при критерии $0,8\sigma$ на 8 % превышает эффективность прогностического уравнения с использованием только температуры воздуха.

Таблица 4

Оценка прогностического уравнения для сроков окончательного взлома припая на подходах к проливу Санникова за период 1980-2007 гг.

Уравнение	Критерий		Обеспеченность, %		Эффект., %
			метод.	природ.	
$D = -5,29T + 0,19S - 0,004P - 2,20$	$0,8\sigma$	7,4 сут	86	65	21
	$0,674\sigma$	6,2 сут	68	57	11

Анабаро-Ленская и Западная Новосибирская полыньи по существующей классификации относятся к постоянным (их сезонная повторяемость превышает 75 %). Физический смысл влияния полыней и площади припая на район подходов к проливу Санникова заключается в том, что в конце мая прекращаются процессы ледообразования, и полыньи становятся аккумуляторами тепла, что в свою очередь способствует разрушению припая в его прикромочной зоне.

Разрушение припая в северной части восточного района моря Лаптевых, где расположен район подходов к проливу Санникова, более подвержено влиянию динамических процессов, чем район подходов к проливу Дм. Лаптева. Район на подходах к проливу Дм. Лаптева расположен в глубине мелководного Янского залива, где припай удерживается банками и стамухами, и на него не оказывают влияние процессы, происходящие в полыньях.

4. Использование автоматизированной программы «Пегас» для прогноза сроков окончательного разрушения припая в районах моря Лаптевых

Автоматическая программа «Пегас» использовалась для прогноза сроков окончательного взлома припая в Восточно-Сибирском море [3]. Программа позволяет определить информативность как точечных измерений (например, данные одной полярной станции), так и полей элементов, представленных в узлах сеточной области. При исследовании информативности полей предусмотрена процедура перехода от значений элемента в узлах сеточной области к разности значений между узлами [4, 5].

Обязательным компонентом программы «Пегас» является информационная система, включающая пополняемые архивы ледовой и гидрометеорологической информации.

Наиболее удобной формой представления последней являются поля атмосферного давления, температуры воды и воздуха, заданные в узлах сеточной области (или в отдельных точках).

Программа позволяет оценивать статистическую связь коэффициентами корреляции по заданному критерию (не менее 0,4), игнорировать или учитывать предиктор, выбирать наиболее значимые предикторы; на основе элементарного дискриминантного анализа проводить обобщение всей информации и рассчитывать обобщенный показатель.

Обобщенный показатель P представляет собой сумму коэффициентов влияния K :

$$P = \sum K_i,$$

где $K = U \cdot r^2$; U – расчетное значение функции по уравнению регрессии; r^2 – квадрат частного коэффициента корреляции.

Аналогично получают обобщенные показатели для нескольких полей. В этом случае суммируются коэффициенты влияния характеристик всех анализируемых полей. Окончательное прогностическое уравнение имеет вид:

$$U = a \sum_1^n P + b,$$

где n – число учитываемых информационных полей.

Для учета атмосферного давления используется сеточная область, приведенная на рис. 4.

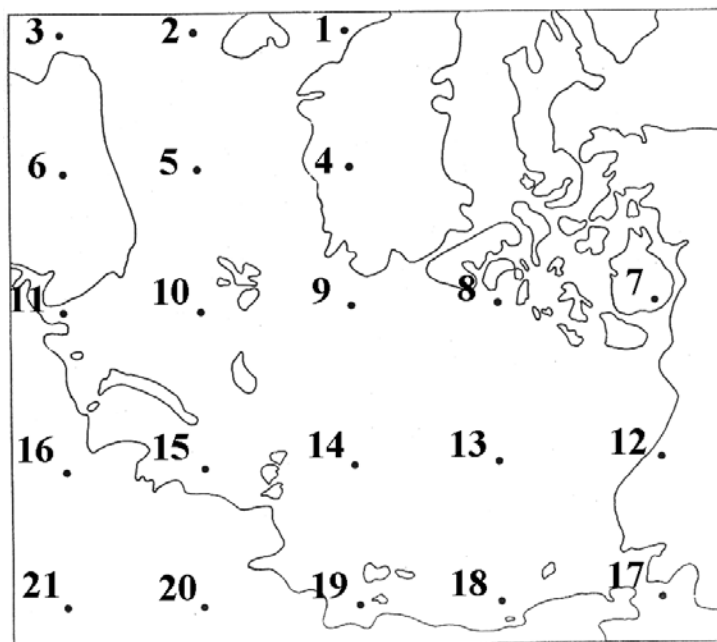


Рис. 4. Схема положения центров сеточной области для учета атмосферного давления.

Программа «Пегас» находит наиболее информативные створы для расчета разностей атмосферного давления (для учета воздушных переносов), влияющие на дату разрушения

припая.

Для нахождения информативных показателей и построения прогностических уравнений сроков взлома припая в районах моря Лаптевых были использованы ряды сроков взлома припая, поля среднемесячного приземного атмосферного давления с января по июнь и ряды среднемесячной температуры воздуха за апрель–июнь по близлежащим полярным станциям. Для восточной части моря Лаптевых использовались данные по температуре полярных станций «Котельный», «Кигилях», «Тикси» за период 1980–2011 гг.

Результаты корреляционного анализа сроков взлома припая с различными показателями барического поля и температурой воздуха на полярных станциях сведены в табл. 5 и 6 для каждого из припайных районов.

В результате преобразования информативных показателей программа рассчитывает коэффициенты (А и В) и обобщенный показатель Р для результирующих корреляционных уравнений для каждого из районов и производит расчет по этим уравнениям для каждого года анализируемого ряда сроков взлома припая. Расчеты для районов 1 и 2 приведены в табл. 7 и 8 соответственно.

Таблицы содержат коэффициенты корреляции результирующего прогностического уравнения (R), квадрат коэффициента корреляции (R^2), характеризующий степень учета уравнением изменчивости сроков взлома припая и обеспеченность расчетного уравнения. В таблицах в рамках выделены ошибочные расчеты (превышающие $\pm 0,8\sigma$), серым цветом выделен период испытаний метода.

Таблица 5

Коэффициенты корреляции сроков взлома припая в районе 1 (подходы к проливу Дм. Лаптева) с показателями атмосферного давления и температурой воздуха

Предикторы	Месяц	Информативные створы, станция	Коэффициенты корреляции
Давление	Январь	6–15	0,48
	Февраль	10–15	0,36
	Март	21	–0,46
	Апрель	5–6	0,35
	Май	13–14	–0,38
	Июнь	12–19	0,43
Площадь припая	Май	Средняя	0,2
	Июнь	Средняя	0,3
Температура воздуха	Май	Котельный	–0,43
	Июнь	Котельный	–0,66
	Май	Тикси	–0,40
	Июнь	Тикси	–0,55
	Май	Кигилях	0,48
	Июнь	Кигилях	0,73

Таблица 6

Коэффициенты корреляции сроков взлома припаяв в районе 2 (подходы к проливу Санникова) с показателями атмосферного давления и температурой воздуха

Предикторы	Месяц	Информативные створы, станция	Коэффициенты корреляции
Давление	Январь	6–15	0,48
	Февраль	10–15	0,36
	Март	21	–0,46
	Апрель	5–6	0,35
	Май	13–14	–0,38
	Июнь	12–19	0,43
Площадь припая	Май	Средняя	0,3
	Июнь	Средняя	0,1
Температура воздуха	Май	Котельный	–0,35
	Июнь	Котельный	–0,64
	Май	Тикси	–0,50
	Июнь	Тикси	–0,67
	Май	Кигилях	–0,41
	Июнь	Кигилях	–0,66

Уравнения для прогноза сроков окончательного взлома припая в районах на подходах к проливам Дм. Лаптева и Санникова приведены в табл. 9. Как видно из таблицы, обеспеченность метода для района 1 составляет 84 % (эффективность – 18 %); для района 2 – 91 % (эффективность – 22 %).

Таблица 9

Расчетные уравнения для прогноза сроков взлома припая в районе 1 на подходах к проливу Дм. Лаптева и районе 2 на подходах к проливу Санникова

Район	Расчетные уравнения	Обеспеченность, %		Эффективность, %
		метода	природн.	
1	$D = 13,972 \cdot P - 29,534$	84	66	18
2	$D = 10,006 \cdot P - 29,402$	91	69	22

5. Результаты испытаний метода прогноза сроков окончательного разрушения припая в районах моря Лаптевых заблаговременностью до одного месяца

Испытания усовершенствованного метода прогноза сроков окончательного разрушения припая в районах моря Лаптевых заблаговременностью до одного месяца проводились в отделе ледового режима и прогнозов ФГБУ «ААНИИ» в период 2009–2011 гг. Методика прогноза основана на физико-статистическом подходе, при котором статистическая связь между предиктантом и предикторами обосновывается физически.

Прогнозы для районов на подходах к проливам Дм. Лаптева и Санникова разработаны двумя способами:

- на основе уравнений множественной регрессии с разным количеством предикторов;
- с использованием автоматической информационной программы «Пегас», которая подбирает наиболее информативные предикторы по мере накопления архива данных.

Результаты испытаний за период 2007–2011 гг. представлены в табл. 10–14. Для оценки средней эффективности прогнозов сравнивалась оправдываемость прогнозов по методу и по норме.

Прогнозы сроков окончательного разрушения припая в районе на подходах к проливу Дм. Лаптева основываются только на температуре полярных станций в районе (табл. 10). В среднем за пять лет оправдываемость прогнозов составила 60 %, что совпадает с оправдываемостью прогнозов по норме за эти же годы.

Таблица 10

Оценка оправдываемости прогнозов сроков окончательного разрушения припая в районе подходов к проливу Дм. Лаптева

Год	Расчетное уравнение	Прогноз	Факт.	Ошибка прогноза по методу, сутки	Оправд. прогноза по методу, %	Ошибка прогноза по норме, сутки	Оправд. прогноза по норме, %
2007	D = 25,0 – 4,9T _{VI}	10VII	10VII	0	100	6	100
2008		13VII	13VII	0	100	3	100
2009	Норма 16VII 0,8σ=6,6 суток	11VII	23VII	–12	0	–7	0
2010		5VII	8VII	–3	100	8	0
2011		16VII	5VII	11	0	0	100
Средняя оправдываемость					60		60
Средняя эффективность							0

Расчетные уравнения для прогнозов сроков окончательного разрушения припая в районе подходов к проливу Санникова разработаны с двух позиций: только с использованием в качестве предиктора температуры воздуха полярных станций в районе (табл. 11) и с учетом в качестве предикторов площадей припая и полыней в восточной части моря Лаптевых (табл. 12). И хотя прогнозы по температуре воздуха вполне удовлетворительны, их эффективность составила 40 % при оправдываемости 80 %, предпочтительнее метод, учитывающий, кроме температуры воздуха, состояние припая и полыней. Оправдываемость прогнозов по этому методу за период 2007–2011 гг. составила 100 %, эффективность – 60 % (табл. 12).

Таблица 11

Оценка оправдываемости прогнозов сроков окончательного разрушения припая в районе подходов к проливу Санникова по температуре воздуха

Год	Расчетное уравнение	Прогноз	Факт.	Ошибка прогноза по методу, сутки	Оправд. прогноза по методу, %	Ошибка прогноза по норме, сутки	Оправд. прогноза по норме, %
2007	D = 21,9 – 5,7T _{VI} Норма 20VII 0,8σ=7,4 суток	18VII	28VI	20	0	22	0
2008		23VII	16VII	7	100	4	100
2009		19VII	23VII	–4	100	–3	100
2010		12VII	9VII	3	100	11	0
2011		16VII	10VII	6	100	10	0
Средняя оправдываемость					80		40
Средняя эффективность							40

Таблица 12

Оценка оправдываемости прогнозов сроков окончательного разрушения припая в районе подходов к проливу Санникова по температуре воздуха, площадям припая и полыней

Год	Расчетное уравнение	Прогноз	Факт.	Ошибка прогноза по методу, сутки	Оправд. прогноза по методу, %	Ошибка прогноза по норме, сутки	Оправд. прогноза по норме, %
2007	D = −5,29T + 0,19S − 0,004P − 2,20	2VII	28VI	4	100	22	0
2008		20VII	16VII	4	100	4	100
2009		21VII	23VII	−2	100	−3	100
2010	Норма 20VII 0,8σ=7,4 суток	10VII	9VII	1	100	11	0
2011		8VII	10VII	−2	100	10	0
Средняя оправдываемость					100		40
Средняя эффективность							60

В табл. 13 и 14 приведены результаты оценки прогнозов сроков окончательного разрушения припая в районах на подходах к проливам Дм. Лаптева и Санникова, разработанных с помощью информационной программы «Пегас». Наиболее удовлетворительные результаты получены для района 1 (табл. 13). По району 2 из пяти прогнозов не оправдались два. Тем не менее эффективность прогнозов превышает прогнозы по норме и составляет 20 %.

Как показывают результаты испытания метода, разработанные физико-статистические модели позволяют достаточно надежно прогнозировать сроки окончательного разрушения припая в районах на подходах к проливам Дм. Лаптева и Санникова. Метод характеризуется

более высокой эффективностью, по сравнению с прогнозами по норме, и может быть использован в оперативной практике.

Таблица 13

Оценка оправдываемости прогнозов сроков окончательного разрушения припая в районе подходов к проливу Санникова по температуре воздуха, площадей припая и полыней

Год	Расчетное уравнение	Прогноз	Факт.	Ошибка прогноза по методу, сутки	Оправд. прогноза по методу, %	Ошибка прогноза по норме, сутки	Оправд. прогноза по норме, %
2007	D = 13,972P – 29,534	13 VII	10VII	3	100	6	100
2008		15 VII	13VII	2	100	3	100
2009		15 VII	23VII	–8	0	–7	0
2010	Норма 16VII 0,8σ=6,6 суток	10 VII	8VII	2	100	8	0
2011		14 VII	10VII	4	100	6	100
Средняя оправдываемость					80		60
Средняя эффективность							20

Таблица 14

Оценка оправдываемости прогнозов сроков окончательного разрушения припая в районе подходов к проливу Санникова по программе «Пегас»

Год	Расчетное уравнение	Прогноз	Факт.	Ошибка прогноза по методу, сутки	Оправд. прогноза по методу, %	Ошибка прогноза по норме, сутки	Оправд. прогноза по норме, %
2007	D = 10,006P – 29,402	21VII	28VI	23	0	22	0
2008		19VII	16VII	3	100	4	100
2009		19VII	23VII	–4	100	–3	100
2010	Норма 20VII 0,8σ=7,4 суток	8VII	9VII	–1	100	11	0
2011		18VII	10VII	8	0	10	0
Средняя оправдываемость					60		40
Средняя эффективность							20

Выводы

ЦМКП Росгидромета на заседании от 27 марта 2012 г. рекомендовала ФГБУ «ААНИИ»:

- учесть высказанные на ЦМКП замечания (при подготовке июньского долгосрочного прогноза не использовать июньские предикторы);
- рекомендовать ФГБУ «ААНИИ» внедрить метод в оперативную практику ФГБУ «ААНИИ» в качестве основного.

Список литературы

1. Горбунов Ю.А., Карелин И.Д., Кузнецов И.М., Лосев С.М., Соколов А.Л. Основы физико-статистических методов ледовых прогнозов и расчетов для арктических морей заблаговременностью до 30 суток. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 288 с.
2. Гудкович З.М., Кириллов А.А., Ковалев Е.Г., Сметанникова А.В., Спичкин В.А. Основы методики долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 348 с.
3. Карклин В.П., Карелин И.Д., Юлин А.В. Метод прогноза сроков окончательного разрушения припая в Восточно-Сибирском море заблаговременностью до одного месяца // Информационный сборник № 38. – 2011. – С. 88–103.
4. Ковалев Е.Г., Николаев Ю.В. Применение дискриминантного анализа для долгосрочного прогноза ледовитости арктических морей // Труды ААНИИ. – 1976. – Т. 320. – С. 4–26.
5. Ковалев Е.Г., Юлин А.В. Автоматизированная прогностическая система для целей научно-оперативного обеспечения навигации в Арктике // Труды ААНИИ. – 1998. – Т. 438. – С. 73–82.

Таблица 7

Расчет сроков окончательного разрушения припая в районе 1 на подходах к проливу Дм.

Лаптева (сутки от 30 июня)

ГОДЫ	P	B	A	R	R ²	Фактич	Расчет	Ошибка
1980	3.428	-29.534	13.972	.819	.670	18.000	18.358	-.358
1981	3.244					12.000	15.797	-3.797
1982	3.725					21.000	22.509	-1.509
1983	3.245					18.000	15.807	2.193
1984	3.482					19.000	19.123	-.123
1985	3.665					15.000	21.671	-6.671
1986	3.317					15.000	16.815	-1.815
1987	3.553					24.000	20.108	3.892
1988	3.303					12.000	16.623	-4.623
1989	3.391					12.000	17.848	-5.848
1990	1.952					2.000	-2.259	4.259
1991	3.597					16.000	20.726	-4.726
1992	3.610					23.000	20.909	2.091
1993	2.931					12.000	11.425	.575
1994	2.993					14.000	12.282	1.718
1995	3.073					10.000	13.401	-3.401
1996	4.829					46.000	37.945	8.055
1997	3.673					30.000	21.783	8.217
1998	3.465					27.000	18.885	8.115
1999	2.783					7.000	9.345	-2.345
2000	3.503					16.000	19.408	-3.408
2001	3.660					19.000	21.611	-2.611
2002	2.809					16.000	9.713	6.287
2003	3.321					12.000	16.871	-4.871
2004	3.518					16.000	19.617	-3.617
2005	2.414					9.000	4.196	4.804
2006	2.929					3.000	11.387	-8.387
2007	3.069					10.000	13.354	-3.354
2008	3.207					13.000	15.278	-2.278
2009	3.158					23.000	14.594	8.406
2010	2.821					8.000	9.879	-1.879
2011	3.115					15.000	13.994	2.006

Таблица 8

Расчет сроков окончательного разрушения припая в районе на подходах к проливу Санникова
(сутки от 30 июня)

ГОДЫ	$P_{\Sigma t}$	B	A	R	R^2	Фактич	Расчет	Ошибка
1980	5.475	-29.402	10.006	.858	.736	26.000	25.380	.620
1981	4.921					18.000	19.833	-1.833
1982	5.985					27.000	30.485	-3.485
1983	5.562					27.000	26.251	.749
1984	5.601					25.000	26.635	-1.635
1985	5.749					25.000	28.120	-3.120
1986	5.208					17.000	22.702	-5.702
1987	5.367					28.000	24.297	3.703
1988	4.993					16.000	20.556	-4.556
1989	5.630					24.000	26.928	-2.928
1990	3.521					7.000	5.823	1.177
1991	5.489					17.000	25.522	-8.522
1992	5.936					34.000	29.987	4.013
1993	4.581					16.000	16.437	-.437
1994	5.197					22.000	22.597	-.597
1995	5.067					17.000	21.292	-4.292
1996	6.962					46.000	40.259	5.741
1997	5.387					32.000	24.502	7.498
1998	5.227					30.000	22.896	7.104
1999	4.711					18.000	17.731	.269
2000	5.174					21.000	22.365	-1.365
2001	5.776					25.000	28.389	-3.389
2002	4.578					19.000	16.406	2.594
2003	4.820					13.000	18.821	-5.821
2004	5.102					23.000	21.646	1.354
2005	3.639					9.000	7.008	1.992
2006	4.587					13.000	16.492	-3.492
2007	5.035					-3.000	20.973	23.027
2008	4.817					16.000	18.797	-2.797
2009	4.871					23.000	19.338	4.662
2010	3.791					9.000	8.528	.472
2011	4.738					10.000	18.006	-8.006

*В.С. Косых, Л.Б. Чубаров, В.К. Гусяков, Д.А. Камаев,
В.М. Григорьева, С.А. Бейзель*

МЕТОДИКА РАСЧЕТА МАКСИМАЛЬНЫХ ВЫСОТ ВОЛН ЦУНАМИ В ЗАЩИЩАЕМЫХ ПУНКТАХ ПОБЕРЕЖЬЯ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

1. Проблема прогнозирования высот волн цунами. Цели разработки методики оценки максимальных высот волн цунами

Явление цунами представляет собой возникновение длиннопериодных волн (17–400 км) в океанах и морях вследствие подводных землетрясений, извержений подводных или островных вулканов, оползней больших масс земных пород. Считается, что в результате землетрясения происходит подвижка дна, имеющая вертикальную составляющую, вызывающая движение больших масс воды.

При создании СПЦ на дальневосточном побережье СССР в 1958–1959 гг. за основу был принят сейсмический метод прогноза, базирующийся на регистрации опережающих цунами сейсмических волн (магнитудно-географический критерий). По данным регистрации землетрясения определяются координаты его эпицентра и магнитуда. По этим двум величинам на основе анализа исторических данных оценивается возможность возникновения цунами.

Основным недостатком службы предупреждения цунами, выявившимся уже в первые годы ее работы, является большое число ложных тревог (до 80 % процентов случаев). В случае сохранения действующих методов прогноза и правил объявления тревоги цунами на основе только магнитудно-географического принципа при дальнейшем техническом совершенствовании службы ее эффективность будет снижаться за счет возрастания числа ложных тревог.

В настоящее время радикальное решение этой проблемы связывается с использованием в оперативной деятельности результатов моделирования характеристик цунами по сейсмологическим данным, а также использованием гидрофизических данных, получаемых при измерении каких-либо характеристик подходящей к берегу волны цунами, для оперативного уточнения результатов моделирования гидрофизических данных.

Целью разработки методики расчета максимальных высот волн цунами является создание методической и технологической основ для оценки по сейсмологическим данным максимальных высот волн цунами.

Методика должна обеспечивать расчет максимальных высот волн цунами в защищаемых пунктах побережья Дальнего Востока Российской Федерации.

2. Поршневая модель генерации волны цунами

Для моделирования процесса возбуждения цунами используется решение замкнутой системы уравнений динамической теории упругости, описывающей колебания слоя сжимаемой жидкости (модель океана), залегающего на поверхности упругого полупространства (модель земной коры и верхней мантии).

В рамках длинноволнового приближения решение такой системы эквивалентно последовательному решению двух отдельных задач:

- 1) определение статических (остаточных) деформаций поверхности упругого полупространства, возникающих под действием внутреннего источника дислокационного типа (разрыва сплошности среды);
- 2) вычисление колебаний однородной несжимаемой жидкости в рамках теории мелкой воды при использовании деформаций дна, вычисленных при решении первой задачи, в качестве неоднородных граничных условий.

Такой подход, получивший название «поршневой модели» возбуждения цунами, широко применяется в задачах численного моделирования цунами в случаях, когда известны параметры очага землетрясения и детальная батиметрия дна океана, и в случаях, когда в этот процесс не вовлекается какой-либо вторичный механизм типа подводного оползня или берегового обвала.

2.1. Модель очага подводного землетрясения

Согласно распространенному представлению, сейсмотектонические цунами вызываются вертикальными смещениями морского дна, происходящими во время подводного землетрясения на больших площадях. В большинстве случаев фактические (вертикальные) смещения морского дна скрыты толщей воды и труднодоступны для непосредственных измерений. В такой ситуации в качестве начальных данных в программах расчета распространения волн цунами могут использоваться теоретически рассчитанные остаточные смещения от соответствующей модели очага землетрясения с параметрами, полученными из сейсмических наблюдений.

На основании сейсмических данных механизм очагов землетрясений определяется с точностью до двух равновероятных плоскостей, перпендикулярных друг другу. Какая из них реализуется в очаге землетрясения – этого по сейсмическим данным сказать нельзя, поэтому необходимо использовать дополнительную информацию. Идентификация одной из плоскостей в качестве истинной требует выбора типа механизма между *крутым взбросом* и *пологим надвигом* (рис. 1).

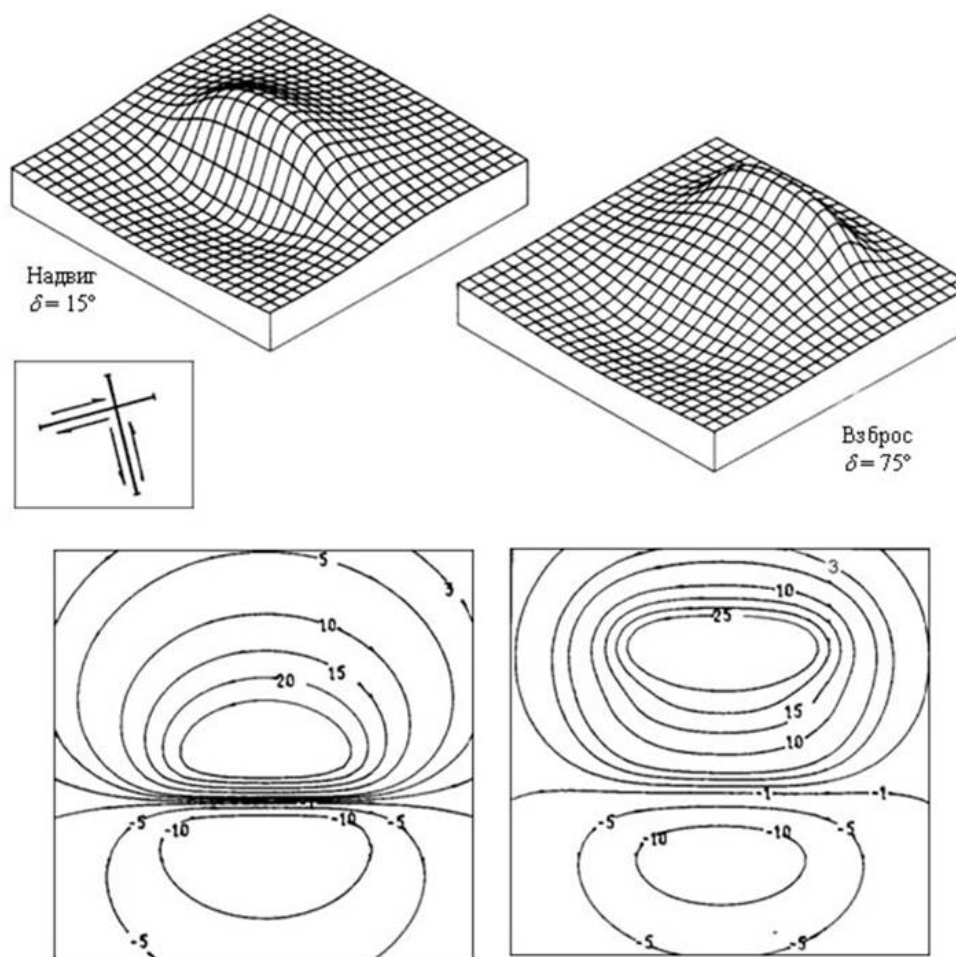


Рис. 1. Основные механизмы очагов подводных землетрясений в периферической части Тихого океана.

Система напряжений, обеспечивающая подвижки по возможным плоскостям, устанавливается на основании сейсмических данных однозначно.

Оба основных механизма (пологий надвиг и крутой взброс) создают примерно одинаковые вертикальные смещения дна в эпицентральной области.

Поршневая модель основана на решении уравнений статической теории упругости для однородного полупространства с внутренним распределенным источником дислокационного типа. Задача определения остаточного смещения морского дна сводится к решению

уравнения равновесия (уравнения Ляме) для вектора смещения частиц среды $\bar{U}$ относительно начального ненапряженного состояния

$$(\lambda + \mu) \operatorname{grad} \operatorname{div} \bar{U} + \mu \Delta \bar{U} + \bar{F} = 0 \quad (1)$$

при нулевых напряжениях на свободной границе упругого полупространства (при $z = 0$)

$$\sigma_z = 0, \tau_{xz} = 0, \tau_{yz} = 0 \text{ при } z = 0, \quad (2)$$

где $\bar{U}(x, y, z)$ – вектор смещения частиц среды относительно начального напряженного состояния; μ и λ – параметры Ляме упругой среды; $\bar{F}$ – приложенная сила, отнесенная к единице объема.

Решение задачи (1) – (2) [1, 2, 4–6] строится для единичной вертикальной и горизонтальной сосредоточенной силы, затем делается переход к дипольным силовым источникам, моделирующим подвижку по бесконечно малому элементу разрыва. Далее решение обобщается на случай пространственного источника дислокационного типа. В качестве меры интенсивности такого источника используется величина его сейсмического момента

$$M_0 = \mu \cdot L \cdot W \cdot D_0, \quad (3)$$

где параметру M_0 по известному корреляционному соотношению [8] может быть сопоставлена величина его моментной магнитуды

$$M_W = 2/3 (\lg M_0 - 9). \quad (4)$$

Смещения для пространственного разрыва вычисляются как сумма смещений элементарных разрывов, вызванных точечными силовыми диполями.

Исходными данными для расчетов начальных смещений в очагах цунами являются положение и параметры описанного выше пространственного дислокационного источника, моделирующего очаг подводного землетрясения (рис. 2):

- длина разрыва L ;
- ширина разрыва W ;
- глубина верхнего края разрыва h_0 ;
- угол простираения (азимут) разрыва θ ;
- угол падения плоскости разрыва δ ;
- направление подвижки в плоскости разрыва λ_0 ,
- смещение противоположных крыльев разрыва (подвижки) D_0 .



2.2. Алгоритмическая реализация модели смещения дна океана в очаге землетрясения

Смещения дна рассчитываются для прямоугольной подобласти, размеры которой примерно вдвое превышают размеры площадки разрыва (величины L и W), в узлах той же сетки, которая используется для расчета распространения цунами. Оценки показывают, что такая подобласть содержит примерно 90 % общего объема перемещения дна бассейна, так что вклад в генерацию цунами неучитываемых деформаций дна во внешней области можно считать достаточно малым. В такой постановке также пренебрегается искажениями поля остаточных смещений, вносимыми неоднородностями свободной границы упругого полупространства (рельефом дна).

Зависимость нарастания смещения от времени аппроксимируется следующей функцией:

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0, \\ t/\tau_0, & 0 \leq t \leq \tau_0, \\ 1, & t \geq \tau_0, \end{cases} \quad (5)$$

где τ_0 – характерное время нарастания смещения по разрыву. Значение параметра τ_0 принимается равным одному шагу по времени разностной схемы, аппроксимирующей систему уравнений, описывающую движение волны цунами в океане.

Перечисленные выше основные параметры подаются на вход программы, предназначенной для расчета начального возмущения на квадратной равномерной сетке в сферических координатах. Сформированный массив начального возмущения подается на вход программы расчета динамических характеристик цунами.

2.3. Методика расчета динамических характеристик волн цунами

Для определения максимальных высот волн цунами в окрестности защищаемых пунктов используются классические уравнения мелкой воды. Построенная на основе этих уравнений численная модель обладает набором физических, географических и математических параметров.

К физико-географическим параметрам относят:

- начальные данные – форма начального смещения свободной поверхности;
- форма границ – очертания берегов и сооружений;
- типы граничных условий;
- батиметрия;
- коэффициент шероховатости донной поверхности.

Математические параметры возникают в ходе построения вычислительных алгоритмов. В модели реализуется алгоритм расчета распространения волн цунами, основанный на различных модификациях конечно-разностной схемы Мак-Кормака [7], с учетом двух типов граничных условий: отражение от вертикальной непроницаемой границы и проход волн за границы расчетной области.

2.3.1. Математическая модель распространения и трансформации волн цунами

При моделировании реальных событий приходится учитывать кривизну земной поверхности, поэтому при описании законов распространения и трансформации цунами на большие расстояния уравнения гидродинамики записываются на сфере. В географической

системе координат линейные уравнения мелкой воды с учетом воздействия внешних сил Кориолиса и донного трения имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \psi} \left[\frac{\partial (Hu)}{\partial \varphi} + \frac{\partial (Hv \cos \psi)}{\partial \psi} \right] &= 0, \\ \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{g}{R \cos \psi} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} &= f_1, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{g}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \psi} &= f_2.\end{aligned}\tag{6}$$

где h – полная глубина слоя жидкости, м; t – время, с; R – средний радиус Земли, км; ψ – географическая широта, град; φ – географическая долгота, град; H – глубина невозмущенного слоя жидкости (океана), м; u – компонента вектора скорости по географической долготе, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; v – компонента вектора скорости по географической широте, м/с; η – смещение свободной поверхности (океана), м; $f_1 = lv - gk^2 \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}$; $f_2 = -lu - gk^2 \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}$; $l = 2\omega \sin \psi$.

При моделировании трансформации волн цунами на их пути от области генерации к защищаемому побережью рассматриваются два варианта взаимодействия волн с границами вычислительной области. Это свободный выход волны за пределы области и отражение от условно возведенной вертикальной стены, с помощью которой моделируются очертания островов, контуры берега и прибрежные сооружения вдоль береговой линии.

На фрагментах внутренней границы, являющихся меридианами, граничные условия имеют вид:

$$u = 0, \partial v / \partial \varphi = 0, \partial \eta / \partial \varphi = 0;$$

а на параллелях, соответственно

$$v = 0, \partial u / \partial \psi = 0, \partial \eta / \partial \psi = 0.$$

На внешних границах $\Omega(\varphi, \psi)$ ставятся условия Зоммерфельда. В случае используемой системы координат они имеют вид следующих соотношений на параллелях:

$$\begin{aligned}R \frac{\partial \eta}{\partial t} \pm c \frac{\partial \eta}{\partial \psi} &= 0, \\ R \frac{\partial u}{\partial t} \pm c \frac{\partial u}{\partial \psi} &= 0, \\ R \frac{\partial v}{\partial t} \pm c \frac{\partial v}{\partial \psi} &= 0\end{aligned}$$

и на меридианах:

$$R \frac{\partial \eta}{\partial t} \pm \frac{c}{\cos \psi} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} = 0,$$

$$R \frac{\partial u}{\partial t} \pm \frac{c}{\cos \psi} \frac{\partial u}{\partial \varphi} = 0,$$

$$R \frac{\partial v}{\partial t} \pm \frac{c}{\cos \psi} \frac{\partial v}{\partial \varphi} = 0,$$

$c = \sqrt{gh}$, выбор знака $\pm$ зависит от направления внешней нормали к соответствующей стороне (границе) прямоугольника.

Начальное смещение свободной поверхности океана (возмущение), порожденное модельным цунамигенным землетрясением, рассчитывается по модели сейсмического источника.

Начальные скорости u_0 и v_0 полагаются нулевыми.

2.3.2. Вычислительные алгоритмы для моделирования распространения и трансформации волн цунами

Область расчета представляет собой прямоугольник $\Omega(\varphi, \psi) = \{(\varphi, \psi) : \varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_2, \psi_1 \leq \psi \leq \psi_2\}$. Верхняя и нижняя стороны прямоугольника параллельны экватору, а левая и правая проходят по меридианам. Звенья границы “вертикальная стенка” проходят через узлы равномерной прямоугольной сетки так, что всегда параллельны внешним сторонам прямоугольника $\Omega(\varphi, \psi)$.

Батиметрия поверхности дна и топография суши являются фиксированными. Математически эти данные представляют собой сеточную функцию $\tilde{H}(\varphi_i, \psi_j)$, $0 \leq i \leq N_\varphi, 0 \leq j \leq N_\psi$, определенную в узлах дискретной области $\overline{\Omega}$. Значения $\tilde{H}(\varphi_i, \psi_j)$ определяются как численные значения глубин и высот (возвышение суши над уровнем моря), заданных на равномерной сетке. Отметим, что $\tilde{H}(\varphi_i, \psi_j)$ совпадает с $H(\varphi_i, \psi_j)$ – глубиной невозмущенного слоя жидкости – в «водных» точках области $\overline{\Omega}$. Значения высот используются при определении заплеска на сухой берег.

В области $\Omega(\varphi, \psi)$ в плоскости географических координат ψ и φ вводится равномерная прямоугольная сетка $\overline{\Omega} = \{(\varphi_i, \psi_j) : \varphi_1 \leq \varphi_i \leq \varphi_2, \psi_1 \leq \psi_j \leq \psi_2, 0 \leq i \leq N_\varphi, 0 \leq j \leq N_\psi\}$ с шагами $\Delta\varphi$ и $\Delta\psi$ по пространственным переменным φ и ψ соответственно; $\Delta\tau^n = t^{n+1} - t^n$ – шаг по времени.

Система уравнений (1) во внутренних узлах сетки $\bar{\Omega}$ аппроксимируется явной двухшаговой конечно-разностной схемой типа Мак-Кормака [7]:

Первый шаг

$$\begin{aligned} \frac{\hat{h}_{ij} - h_{ij}^n}{\tau^n} + \frac{1}{R \cos \psi_j} \left[\frac{H_{ij}^n u_{ij}^n - H_{i-1j}^n u_{i-1j}^n}{\Delta \varphi} + \frac{\cos \psi_j H_{ij}^n v_{ij}^n - \cos \psi_{j-1} H_{ij-1}^n v_{ij-1}^n}{\Delta \psi} \right] &= 0, \\ \frac{\hat{u}_{ij} - u_{ij}^n}{\tau^n} + \frac{g}{R \cos \psi_j} \frac{\eta_{ij}^n - \eta_{i-1j}^n}{\Delta \varphi} &= f_{1ij}^n, \\ \frac{\hat{v}_{ij} - v_{ij}^n}{\tau^n} + \frac{g}{R} \frac{\eta_{ij}^n - \eta_{ij-1}^n}{\Delta \psi} &= f_{2ij}^n. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь $f_{1ij}^n = l_j v_{ij}^n - g k^2 \frac{u_{ij}^n \sqrt{(u_{ij}^n)^2 + (v_{ij}^n)^2}}{(h_{ij}^n)^{4/3}}$, $f_{2ij}^n = -l_j u_{ij}^n - g k^2 \frac{v_{ij}^n \sqrt{(u_{ij}^n)^2 + (v_{ij}^n)^2}}{(h_{ij}^n)^{4/3}}$, $l_j = 2\omega \sin \psi_j$.

Второй шаг

$$\begin{aligned} \frac{h_{ij}^{n+1} - (h_{ij}^n + \hat{h}_{ij})/2}{\tau^n/2} + \frac{1}{R \cos \psi_j} \left[\frac{H_{i+1j}^n \hat{u}_{i+1j} - H_{ij}^n \hat{u}_{ij}}{\Delta \varphi} + \frac{\cos \psi_{j+1} H_{i+1j}^n \hat{v}_{i+1j} - \cos \psi_j H_{ij}^n \hat{v}_{ij}}{\Delta \psi} \right] &= 0, \\ \frac{u_{ij}^{n+1} - (u_{ij}^n + \hat{u}_{ij})/2}{\tau^n/2} + \frac{g}{R \cos \psi_j} \frac{\hat{h}_{i+1j} - H_{i+1j}^n - \hat{h}_{ij} + H_{ij}^n}{\Delta \varphi} &= \bar{f}_{1ij}, \\ \frac{v_{ij}^{n+1} - (v_{ij}^n + \hat{v}_{ij})/2}{\tau^n/2} + \frac{g}{R} \frac{\hat{h}_{i+1j} - H_{i+1j}^n - \hat{h}_{ij} + H_{ij}^n}{\Delta \psi} &= \bar{f}_{2ij}, \\ \bar{f}_{1ij} = l_j \hat{v}_{ij} - g k^2 \frac{\hat{u}_{ij} \sqrt{(\hat{u}_{ij})^2 + (\hat{v}_{ij})^2}}{(\hat{h}_{ij})^{4/3}}, \quad \bar{f}_{2ij} = -l_j \hat{u}_{ij} - g k^2 \frac{\hat{v}_{ij} \sqrt{(\hat{u}_{ij})^2 + (\hat{v}_{ij})^2}}{(\hat{h}_{ij})^{4/3}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для расчета по описанному выше алгоритму необходимо задать значения физических параметров (R, ω, g, k) , а также шаг по времени разностной схемы. Последний не является постоянным, а на каждом шаге вычисляется из условия устойчивости:

$$\begin{aligned} K \equiv \frac{\tau^{n+1}}{R} \left(\max_{\bar{\Omega}} (u_{ij}^n) / (\Delta \varphi \min(\cos \psi_1, \cos \psi_2)) + \right. \\ \left. + \max_{\bar{\Omega}} (v_{ij}^n) / \Delta \varphi + \sqrt{g \left(1 / (\Delta \varphi \min(\cos \psi_1, \cos \psi_2)) \right)^2 + 1 / (\Delta \psi)^2} \max_{\bar{\Omega}} (h_{ij}^n) \right) \leq 1. \end{aligned} \quad (9)$$

где K – число Куранта. Теоретически желательно использовать значение K , наиболее близкое к единице, но в расчетах предусматривается некоторый запас устойчивости, поэтому принимается $K = 0,9$.

Для стабилизации решения в случае возникновения разного рода вычислительных неустойчивостей используются следующие вспомогательные методы:

- применение искусственной вязкости;
- избирательная фильтрация высокочастотных возмущений свободной поверхности;
- коррекция решения в случае нефизического роста скоростей.

Обеспечение необходимой точности расчета достигается за счет локального сгущения сетки в окрестности защищаемых пунктов.

3. Основные технологические этапы выполнения работ по расчету максимальных высот волн цунами в защищаемых пунктах побережья Дальнего Востока Российской Федерации

Методика выполнения работ включает следующие технологические этапы:

3.1. Утверждение перечня защищаемых пунктов Дальневосточного побережья РФ. На основе изучения сеймотектонической обстановки в цунамигенных зонах, угрожающих этому побережью, определяется схема возможного размещения модельных землетрясений.

3.2. Разработка и утверждение совокупности модельных цунамигенных землетрясений, основанных на модели Подъяпольского-Гусякова-Окады [3]. Эта работа также выполняется с привлечением дополнительных экспертных оценок.

3.3. Создание массива батиметрии, ее коррекция и подбор параметров сглаживания для обеспечения устойчивости расчетов.

3.4. Установка мареографов вблизи защищаемых пунктов.

3.5. Проведение производственных расчетов, в ходе которых определяются:

а) для каждого модельного землетрясения:

- максимальные значения уровня водной поверхности в каждом защищаемом пункте,
- минимальные значения уровня водной поверхности в каждом защищаемом пункте,
- максимальная высота волны – полусумма максимальных и минимальных значений уровня в пределах одного колебания в каждом защищаемом пункте;
- максимальный размах колебаний – полусумма максимальных и минимальных значений уровня за все время колебаний в каждом защищаемом пункте;
- диаграмма направленности («свечения» – максимумы и минимумы уровня свободной поверхности во всей области за все время расчета).

Для каждого землетрясения определяется время прихода максимума и минимума волн (по всем защищаемым пунктам), а также названия защищаемых пунктов, в которых эти значения были определены.

б) для каждого защищаемого пункта:

- максимальные значения уровня свободной поверхности, порожденные каждым модельным очагом землетрясения;
- минимальные значения уровня свободной поверхности, порожденных каждым модельным очагом землетрясения;
- максимальный размах колебаний – сумма абсолютных величин максимальных и минимальных значений уровня за все время колебаний, порожденные каждым модельным очагом.

Для каждого защищаемого пункта определяются время наступления максимума и минимума, а также имена (индексы) землетрясений, породивших эти экстремальные значения.

4. Выбор параметров модели очага землетрясения

4.1. Сейсмотектоническая характеристика акваторий Дальневосточного региона Российской Федерации

Непосредственную угрозу цунами для восточного побережья Камчатки и Курильских островов представляют очаги мелкофокусных подводных землетрясений, расположенные в основной Курило-Камчатской сейсмотектонической зоне, которая протягивается вдоль всего восточного побережья Курильских островов и Камчатки и располагается между внешним краем шельфа и осью глубоководного желоба. На севере эта зона примыкает к Алеутско-Аляскинской сейсмической зоне, подходящей к ней под прямым углом в районе полуострова Камчатский, образуя здесь сложный сейсмотектонический узел стыка трех плит – Тихоокеанской, Северо-Американской и Охотской. На юге Курило-Камчатская зона плавно (при небольшом угловом несогласии) сочленяется с Японской сейсмоактивной зоной в районе пролива Цугару, разделяющего острова Хоккайдо и Хонсю. Общая протяженность зоны составляет около 2300 км при средней ширине порядка 150 км.

Согласно концепции тектоники плит, сейсмические процессы в периферийных частях Тихого океана обусловлены поддвигом океанической плиты под континентальную в зонах островных дуг и активных континентальных окраин. Типичным примером такой зоны является Курильская островная дуга.

4.2. Курило-Камчатская зона

Основную угрозу цунами для побережья Курильских островов несут очаги мелкофокусных подводных землетрясений, расположенные в основной Курило-Камчатской сейсмотектонической зоне.

При построении моделей очагов для этого региона за основу было принято распределение модельных очагов землетрясений с магнитудой $M_w = 7,8$, которая является пороговой для возбуждения цунами, опасных для восточного побережья Курил и Камчатки. Карта расположения очагов модельных землетрясений с $M_w = 7,8$ в Курило-Камчатской зоне приведена на рис. 3.

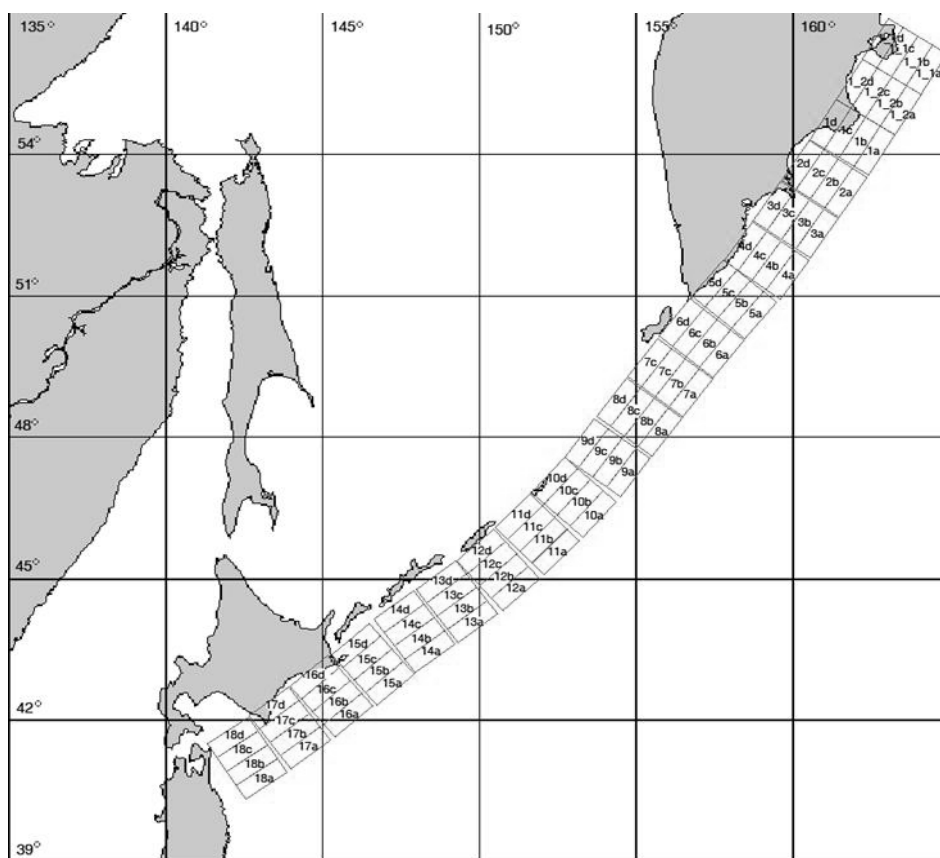


Рис. 3. Карта расположения очагов модельных землетрясений с $M_w=7,8$ в Курило-Камчатской зоне.

Размеры плоскости разрыва для очагов данной магнитуды были приняты равными $L = 108$ км, $W = 38$ км при величине подвижки $D_0 = 2,74$ м.

В качестве основного механизма очагов был принят пологий надвиг по главной литосферной границе раздела этой зоны, т.е. границе между поддвигаемой океанической корой и надвигающимся на нее островодужным выступом континентальной литосферы.

Углы падения плоскости разлома были приняты равными $\delta = 15^\circ$, направление подвижки $\lambda = 90^\circ$.

Четыре полосы таких модельных очагов, с 18 очагами в каждой полосе, равномерно располагаются в зоне субдукции тихоокеанской океанической плиты под азиатскую континентальную плиту. Глубина верхнего края разрыва каждой следующей полосы

закономерно увеличивается (в соответствии с углом падения плоскости разрыва) по мере удаления от оси глубоководного желоба.

Карта модельных землетрясений для более сильных и предельно возможных для южной части Курило-Камчатской зоны землетрясений с магнитудами $M_w = 8,4$ представлена на рис. 4.

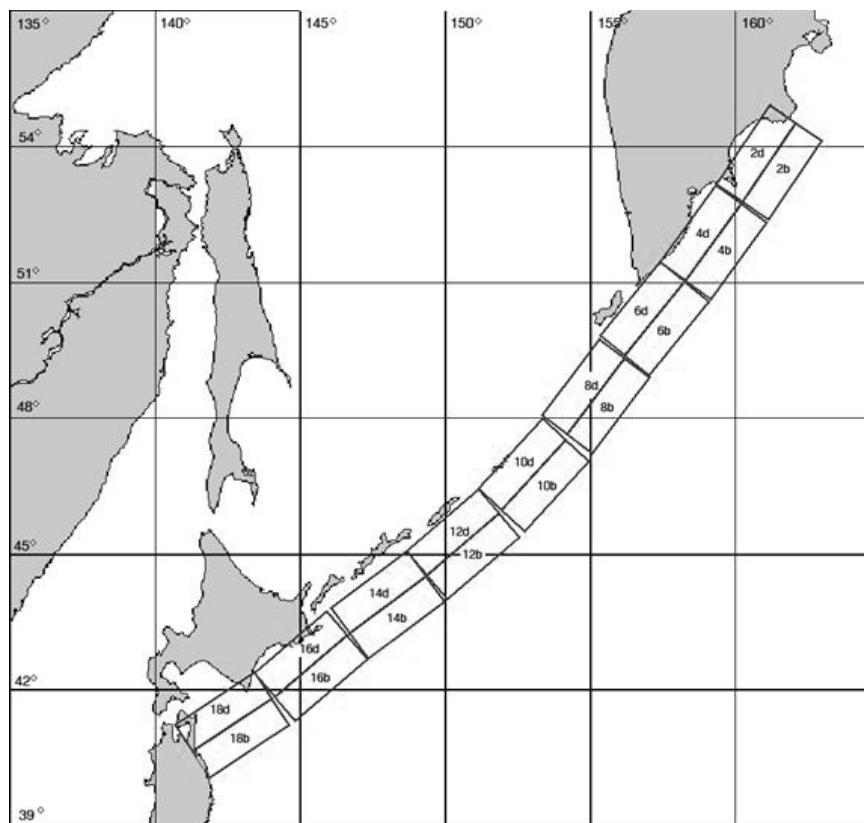


Рис. 4. Карта расположения очагов модельных землетрясений с $M_w = 8,4$ в Курило-Камчатской зоне.

Размеры плоскостей разрывов для этих модельных землетрясений приняты равными: $L = 215$ км, $W = 75$ км и $L = 430$ км, $W = 150$ км.

Механизмы землетрясений в этом случае были приняты аналогичными механизмам очагов с магнитудой 7,8, т.е. пологие надвиги, происходящие по основной литосферной границе раздела ($\delta = 15^\circ$, $\lambda = 90^\circ$). В каждом блоке поперек простирания сейсмоактивной зоны располагаются по два таких очага, вдоль простирания на всем протяжении зоны располагается девять блоков.

4.3. Приморье и Сахалин

Основная угроза цунами для побережья Приморья и Сахалина исходит от мелкофокусных землетрясений, происходящих в восточной части Японского моря, южной части Татарского пролива и частично от землетрясений в южной части Охотского моря,

происходящих вблизи северного побережья Хоккайдо. Карта модельных землетрясений представлена на рис. 5.

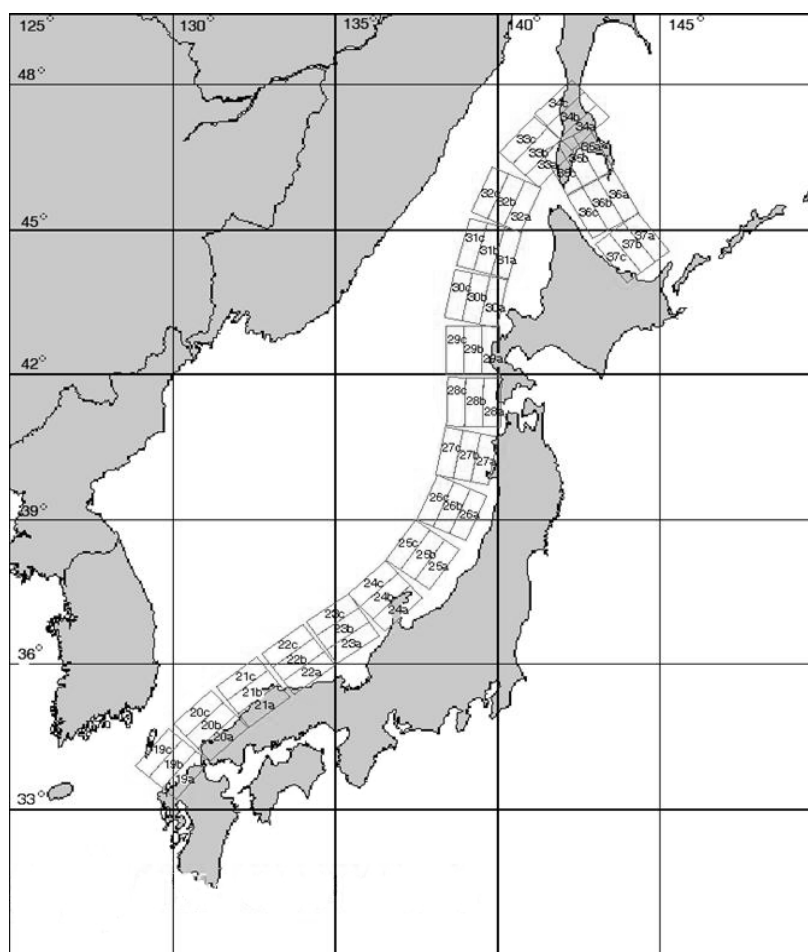


Рис. 5. Карта расположения очагов модельных землетрясений с $M_w=7.8$ в Японской и Сахалинской зонах.

Очаги в восточной части Японского моря аппроксимировались системой подвижек с параметрами:

$$\lambda = 90^\circ, \quad \delta = \pm 70^\circ.$$

Размеры плоскостей разрыва для этих землетрясений были приняты такими же, как и для основной системы очагов, располагающихся вдоль глубоководного желоба, т.е. $L = 108$ км, $W = 38$ км, $D_0 = 2,74$ м.

4.4. Дальняя зона

Схема размещения потенциально опасных очагов цунамигенных землетрясений с магнитудой $M_w = 9,0$ в дальней зоне приведена на рис. 6. Очаг такого землетрясения представляет собой площадку разрыва длиной $L = 430$ км, шириной $W = 150$ км, величиной подвижки $D = 11,6$ м.

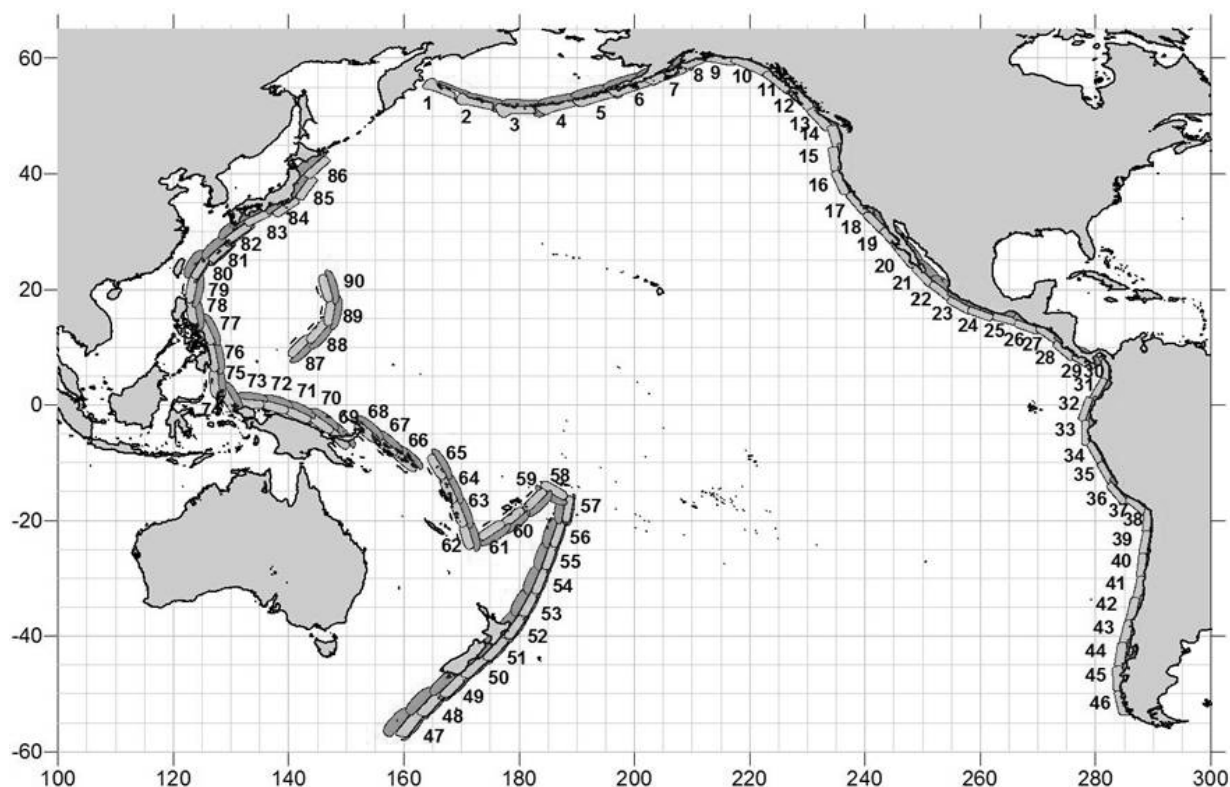


Рис. 6. Карта расположения очагов модельных землетрясений с $M_w=9.0$ в дальней зоне.

На рис. 6 цифрами обозначены группы:

1. Алеутско-Аляскинская группа (1–8),
2. Североамериканская группа (9–22),
3. Центрально-американская группа (23–29),
4. Южноамериканская группа (30–46),
5. Группа Новой Зеландии – Тонга (47–57),
6. Группа Папуа-Новой Гвинеи – Соломоновых островов (58–74),
7. Филиппинская группа (75– 86),
8. Группа Гуама (87–90).

5. Результаты испытания методики

Тестирование методики проводилось на данных глубоководных (система DART) и прибрежных станций измерений уровня моря для реальных событий цунами 11 марта 2011 года вблизи острова Хоккайдо (Япония). Результаты сравнения измеренных приборами DART и рассчитанных значений уровней моря, приведенные на рис. 7, показывают хорошее соответствие.

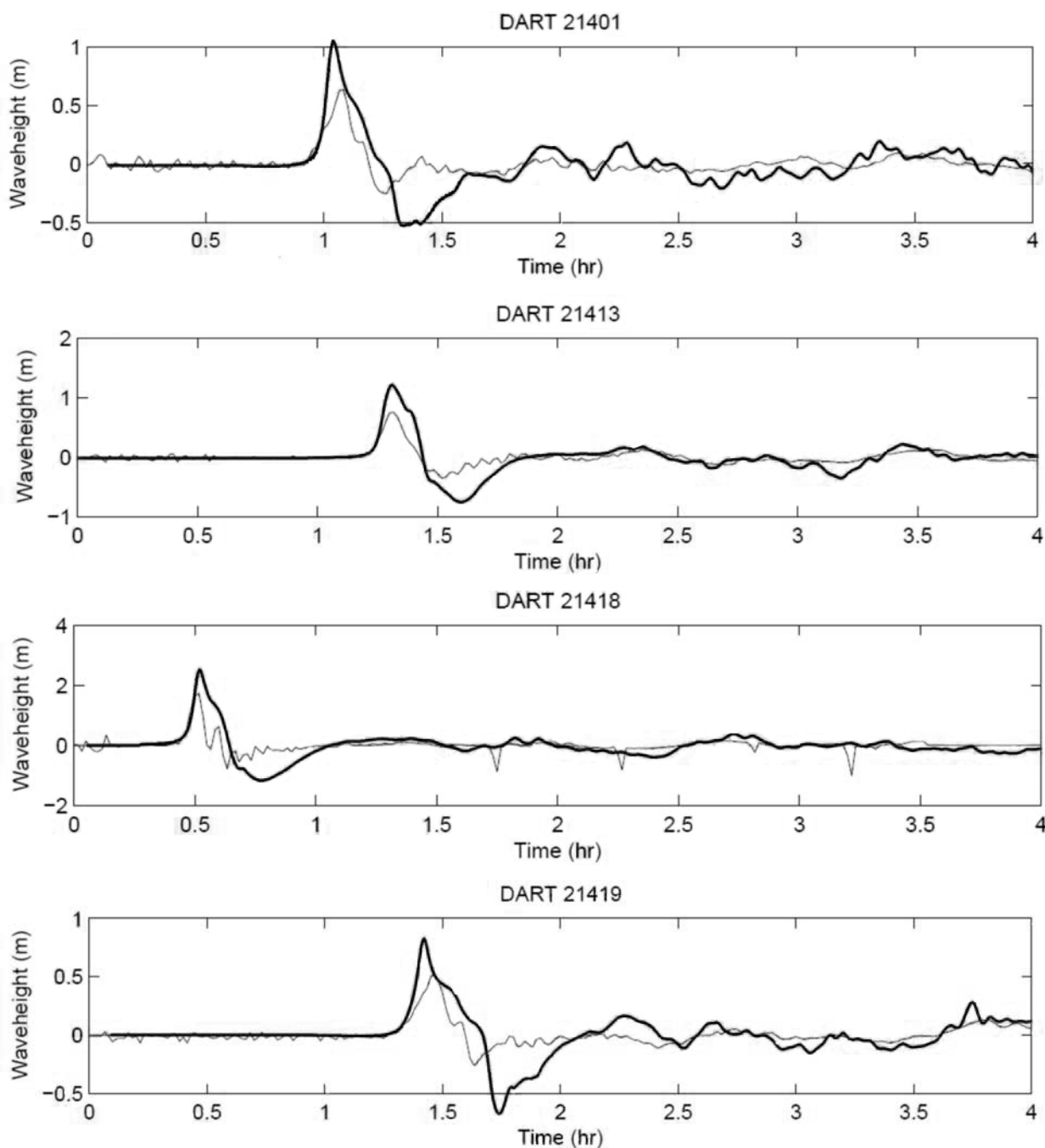


Рис. 7. Сравнение измерений мареографов рассчитанных уровней моря. Район Тохоку (северо-восток о.Хонсю) цунами 11.03.2011 г. Черная линия – расчеты. Серая линия – данные.

Заключение

В решении Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и геологическим прогнозам Росгидромета от 13 июня 2012 г. отмечено, что:

- в ФГБУ «НПО «Тайфун» совместно с ИВТ СО РАН, ИВМ и МГ СО РАН проводятся работы по созданию методов прогнозирования генерации и распространения волн цунами, баз прогностических данных, используемых в оперативной работе центров предупреждения о цунами Российской системы предупреждения о цунами (СПЦ);

– представленный к рассмотрению метод расчета максимальных высот волн цунами в защищаемых пунктах побережья Дальнего Востока Российской Федерации по сейсмологическим данным (времени в очаге, магнитуде землетрясения, координатам эпицентра) позволяет решать следующие практические задачи по обеспечению функционирования Службы предупреждения о цунами на Дальнем востоке Российской Федерации: определение потенциально опасных для Дальневосточного побережья Российской Федерации цунамигенных землетрясений; построение модельных очагов цунамигенных землетрясений, включая моделирование поля начальных возмущений поверхности океана; моделирование поля максимальных и минимальных высот волн в виде сеток (картин свечения); проведение предварительного математического моделирования с целью оперативного прогнозирования характеристик цунами;

– эффективность представленного метода расчета по сейсмологическим данным (времени в очаге, магнитуде землетрясения, координатам эпицентра) максимальных высот волн цунами в защищаемых пунктах побережья Дальнего Востока Российской Федерации подтверждается сравнением результатов моделирования генерации и распространения волн цунами с данными регистрации волн цунами донными станциями, а также сопоставления с данными регистрации волн цунами береговыми постами измерений уровня моря.

ЦМКП считает необходимым одобрить работу ФГБУ «НПО «Тайфун» совместно с ИВТ СО РАН, ИВМ и МГ СО РАН по созданию метода расчета максимальных высот волн цунами в защищаемых пунктах побережья Дальнего Востока Российской Федерации.

ЦМКП считает необходимым рекомендовать:

– использовать разработанный метод расчета максимальных высот волн цунами по сейсмологическим данным (времени в очаге, магнитуде землетрясения, координатам эпицентра) в качестве основного метода для прогнозирования характеристик цунами в оперативной работе центров предупреждения о цунами Российской СПЦ;

– продолжить разработку методов практической оценки характеристик цунами в интересах Службы предупреждения о цунами в части моделирования наката волн цунами на берег.

Список литературы

1. Введенская А.В. Определение полей смещения при землетрясениях с помощью теории дислокации // Известия АН СССР. Серия геофизич. – 1956. – № 3. – С. 277–284.
2. Введенская А.В. О поле смещений при разрывах сплошности упругой среды // Известия АН СССР. Серия геофизич. – 1959. – № 4. – С. 516–526.

3. *Гусяков В.К.* Остаточные смещения на поверхности упругого полу пространства // Условно-корректные задачи математической физики в интерпретации геофизических наблюдений. – Новосибирск: ВЦ СО РАН, 1978. – С. 23–51.

4. *Костров Б.В.* Механика очага тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1975. – 176 с.

5. *Лурье А.И.* Пространственные задачи теории упругости. – М.: ГИТТЛ, 1955. – 491 с.

6. *Снеддон И., Бэрри Д.* Классическая теория упругости. – М.: Физматгиз, 1961. – 220 с.

7. *Федотова З.И.* О применении разностной схемы Мак-Кормака для задач длинноволновой гидродинамики // Вычислительные технологии. – 2006. – Т. 11. Часть 2. Специальный выпуск. – С. 53–63.

8. *Aki K.* Earthquake mechanism // Tectonophysics. – 1972. – Vol. 13. – P. 423–446.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА
УРОЖАЙНОСТИ И ВАЛОВОГО СБОРА ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ
И ОВСА ПО НОВОСИБИРСКОЙ И КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТЯМ,
АЛТАЙСКОМУ КРАЮ И УРОЖАЙНОСТИ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ
ПО ОТДЕЛЬНЫМ АДМИНИСТРАТИВНЫМ РАЙОНАМ
НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ**

Методы прогноза урожайности и валового сбора ярового ячменя и овса по Новосибирской и Кемеровской областям, Алтайскому краю и урожайности яровой пшеницы по отдельным административным районам Новосибирской области разработаны в рамках выполнения региональной темы 8.72 Плана НИОКР Росгидромета на 2008-2009 гг. (авторы – Т.В. Старостина (ФГБУ «СибНИГМИ»), И.Г. Ковригина (ФГБУ «Новосибирский ЦГМС-РСМЦ»), Г.Н. Тюкало (ФГБУ «Кемеровский ЦГМС»), Е.И. Янова (ФГБУ «Алтайский ЦГМС»)) [1].

Рассматриваемые методы прогноза базируются на физико-статистических моделях, отражающих связи между урожайностью зерновых культур и основными метеорологическими и агрометеорологическими факторами. Для каждой территории (области, края) испытывались две прогностические модели, позволяющие прогнозировать урожайность в весе после доработки в единые по России сроки: 21–23 июня и 21–23 июля, отличающиеся друг от друга набором предикторов.

Агрометеорологические параметры, используемые в качестве потенциальных предикторов, выбирались из материалов наблюдений гидрометеорологических станций. Для построения прогностических моделей использованы следующие параметры, достаточно хорошо описывающие агрометеорологические условия вегетационного периода: сумма осадков (за период с марта по вторую декаду июля), среднесуточная температура воздуха, накопленная температура воздуха, определяемая как сумма температур за период с мая по вторую декаду июля, дефицит влажности воздуха за период с мая по вторую декаду июля. Для оценки увлажнения вегетационного периода (май – вторая декада июля) использовались широко применяемые в агрометеорологии значения гидротермического коэффициента Г.Т. Селянинова [3].

Кроме того, при создании прогностических моделей, в отличие от ранее разработанных методов [4–6], которые прогнозируют урожайность в бункерном весе, использовались ряды урожайности зерновых культур в весе после доработки.

Разработанные методы прогноза являются основой созданной автоматизированной технологии расчета прогноза урожайности яровой пшеницы, овса и ярового ячменя, реализованной на персональном компьютере. Составной частью технологии является автоматизированная выборка информации по Новосибирской области из базы автоматизированной системы обработки агрометеорологических данных (АСОАМИ), по Кемеровской области и Алтайскому краю – из электронной версии таблиц ТСХ-1. Оценка урожайности и валового сбора зерновых культур также производится в рамках технологии.

Авторские испытания методов проводились на независимом материале 2006–2008 гг. Производственные испытания осуществлялись по Новосибирской области – в группе агрометпрогнозов Гидрометцентра, по Алтайскому краю – в отделе агрометеорологии и агрометпрогнозов, по Кемеровской области – в ОГМО Кемеровского ЦГМС в оперативном режиме в период 2009–2011 гг.

Оценка успешности методов прогноза среднеобластной урожайности ярового ячменя, овса и среднерайонной урожайности яровой пшеницы проводилась согласно [2]. Сравнительная оценка успешности испытываемых методов осуществлялась с инерционными и климатологическими прогнозами. С целью получения более достоверных выводов об испытываемых методах проанализированы оправдываемости прогнозов за период 2006–2011 гг., включающий авторские и производственные испытания.

Результаты испытаний методов по Новосибирской области

Результаты испытания метода прогноза среднеобластной урожайности ярового ячменя по территории Новосибирской области представлены в табл. 1. Как видно, оправдываемость предварительного прогноза (срок 21–23 июня) в период производственных испытаний (2009–2011 гг.) оказалась на 4–7 % ниже оправдываемости аналогичных прогнозов периода авторской проверки. Оправдываемость уточненных прогнозов (срок 21–23 июля) в период производственных испытаний на 4–5 % выше оправдываемости предварительных прогнозов. Причем методические прогнозы второго срока (21–23 июля) по качеству одинаковы в период производственных и авторских испытаний (92–93 %). Средняя оправдываемость методических предварительных прогнозов (срок 21–23 июня), рассчитанная за период авторских и производственных испытаний, по обеим моделям составила 91 %, что выше оправдываемости инерционных и климатологических прогнозов на 7 и 15 % соответственно. Средняя оправдываемость методических уточненных прогнозов (срок 21–23 июля)

составила 93 % по обеим моделям, что выше инерционных и климатологических на 9 и 17 % соответственно (табл. 1).

Таблица 1

Оправдываемость (%) прогнозов урожайности ярового ячменя и овса по Новосибирской области (по величине относительной ошибки)

Прогноз по заблаговременност и	Методические прогнозы				Инерцион- ные прогнозы	Климато- логические прогнозы
	№ модели	авторские испытания 2006–2008 гг.	производ- ственные испытания 2009–2011 гг.	средняя 2006–2011 гг.	средняя 2006–2011 гг.	
Ячмень						
Предварительный (срок 21-23 июня)	1	95	88	91	84	76
	2	93	89	91	84	76
Уточненный (срок 21-23 июля)	1	93	93	93	84	76
	2	93	92	93	84	76
Овес						
Предварительный (срок 21-23 июня)	1	90	80	85	80	78
	2	94	85	90	80	78
Уточненный (срок 21-23 июля)	1	92	90	91	80	78
	2	91	91	91	80	78

Оценки оправдываемости методических прогнозов среднеобластной урожайности ярового ячменя по величине допустимой погрешности ($\Delta\sigma$) представлены в табл. 2. Как видно, методические прогнозы имеют явное преимущество перед инерционными и климатологическими. Оправдываемость предварительных и уточненных прогнозов по обеим моделям (по 6 прогнозов) за период испытаний 100 %, успешность инерционных и климатологических прогнозов за этот же период в два раза ниже (50 %).

Результаты испытания метода прогноза среднеобластной урожайности овса по территории Новосибирской области представлены в табл. 1 и 2. Если сравнивать прогнозы с разной заблаговременностью, то получаем выводы, аналогичные полученным выводам для прогноза ячменя: уточненные прогнозы (срок 21–23 июля) точнее предварительных (срок 21–23 июня), в период производственных испытаний оправдываемость прогнозов ниже, чем в период авторских испытаний. В сравнении с инерционными и климатологическими оправдываемость методических прогнозов (предварительных и уточненных по обеим моделям) на 5–13 % выше. Из трех предварительных прогнозов (срок 21–23 июня) в период оперативных испытаний не оправдался прогноз, составленный по первой модели в 2009 году. Если сравнить методические прогнозы двух зерновых культур, то можно сделать

вывод, что по Новосибирской области более точно прогнозируется урожайность ярового ячменя.

Аналогичные выводы получены и при сравнении методических прогнозов овса согласно [2] по величине допустимой погрешности $\Delta\sigma$. Прогнозируемая урожайность оказалась ниже фактической на 5,1 ц/га, что превысило допустимую погрешность ($0,8\sigma$) на 1,5 ц/га. Методические прогнозы имеют преимущество перед инерционными и климатологическими как по оправдываемости, так и по величине относительной ошибки. За период испытаний не оправдался лишь один прогноз по первой модели первого срока выпуска прогноза (21–23 июня).

Результаты оценки качества методических прогнозов среднерайонной урожайности яровой пшеницы по величине относительной ошибки по десяти административным районам Новосибирской области представлены в табл. 3.

Таблица 3

Оправдываемость прогнозов урожайности яровой пшеницы по районам Новосибирской области (по величине относительной ошибки)

Район	Методические прогнозы				Инерционные прогнозы	Климатологические прогнозы
	модель	авторские испытания 2006-2008 гг.	производственные испытания 2009-2011 гг.	средняя 2006-2011 гг.	средняя 2006-2011 гг.	
Убинский	1	95	93	94	85	78
	2	95	90	92	85	78
Купинский	1	91	88	90	55	68
	2	91	86	89	55	68
Чистоозерный	1	79	82	81	51	68
	2	80	84	82	51	68
Усть-Тарковский	1	93	90	92	84	76
	2	96	82	89	84	76
Чановский	1	80	95	87	55	47
	2	89	83	86	55	47
Татарский	1	96	88	92	78	67
	2	97	86	92	78	67
Чулымский	1	94	80	86	87	87
	2	88	82	85	87	87
Карасукский	1	87	80	84	80	83
	2	88	90	89	80	83
Кочковский	1	95	90	93	85	84
	2	94	80	87	85	84
Баганский	1	81	80	81	77	68
	2	89	84	87	77	68

Как видно из таблицы, по большинству районов оправдываемость методических прогнозов в период производственных испытаний была ниже, чем в период авторских

испытаний. По Убинскому, Купинскому, Усть-Таркскому (модель 2), Чановскому (модель 2), Татарскому (модель 1), Чулымскому (модель 2), Карасукскому (модель 1), Кочковскому (модель 1) и Баганскому районам ниже на 1–8 %, по Кочковскому району (модель 2), Чулымскому (модель 1), Татарскому (модель 2), Усть-Татарскому (модель 2) – на 11–15 %. Только по Чистоозерному и Карасукскому, а также Чановскому (модель 1) районам оправдываемость методических прогнозов в период производственных испытаний была на 2–4 % и 15 % соответственно выше аналогичных прогнозов периода авторских испытаний. Неудачными были методические прогнозы в 2011 г.: прогнозируемая урожайность оказалась меньше фактической

По результатам авторских и производственных испытаний за 6 лет средняя оправдываемость прогнозов, составленных по испытываемому методу, оказалось достаточно высокой: от 81 до 94 %, что входит в пределы или выше принятого порога успешности агрометеорологических прогнозов, а также выше оправдываемости инерционных и климатологических прогнозов: на 13–35 % по Купинскому и Чистоозерному районам, Чановскому району – на 32–40 %.

Оценки оправдываемости методических прогнозов урожайности яровой пшеницы по районам Новосибирской области по величине допустимой погрешности ($0,67\sigma$) представлены в табл. 4. По пяти районам (Убинский, Купинский, Чистоозерный, Усть-Таркский, Чановский) оправдываемость методических прогнозов по обеим моделям составила 100 %, что на 17–67 % выше оправдываемости инерционных и климатологических прогнозов. Оправдываемость методических прогнозов составила 100 % также по второй модели по Карасукскому району и по первой модели по Кочковскому району. По Татарскому и Чулымскому районам по обеим моделям оправдываемость методических прогнозов составила 83 %. Такую же оправдываемость показали методические прогнозы, составленные по первой модели по Карасукскому району и по второй модели по Кочковскому и Баганскому районам. Самую низкую оправдываемость (50 %) методические прогнозы имели по первой модели по Баганскому району (два неудачных прогноза в период оперативной и один – в период авторской проверки). Причем оправдываемость методических прогнозов в этом случае оказалась чуть выше климатологических прогнозов и не превысила уровень инерционных прогнозов. По другим районам, когда оправдываемость прогнозов не была 100%-ной, методические прогнозы превосходили на 16–50 % по оправдываемости инерционные и на 16–66 % – климатологические, за исключением Чулымского района, в котором оправдываемость (83 %) всех прогнозов была на одном уровне, и только в этом районе относительная ошибка методических прогнозов выше, чем инерционных и климатологических.

Решением Технического совета ФГБУ «Новосибирский ЦГМС-РСМЦ» от 10.04.2012 г. рекомендованы к внедрению в оперативную практику в качестве основных методы прогнозов среднеобластной урожайности и валового сбора ярового ячменя на сроки 21–23 июня (модель 2) и 21–23 июля (модель 1) и овса на сроки 21–23 июня (модель 2) и 21–23 июля (модель 2) по территории Новосибирской области, а также метод средней урожайности яровой пшеницы на срок 21–23 июля по 10 административным районам Новосибирской области (Убинский, Купинский, Усть-Тарковский, Чановский, Татарский, Чулымский, Кочковский районы - модель 1, Чистоозерный, Карасукский, Баганский районы – модель 2).

Результаты испытаний методов по Кемеровской области

По Кемеровской области испытывались методы прогноза среднеобластной урожайности ярового ячменя и овса, результаты испытаний представлены в табл. 5 и 6. Как видно из табл. 5, наиболее успешными были методические прогнозы, составленные во второй срок (21–23 июля – уточненные прогнозы) по обеим моделям, как за период производственных, так и за период авторских испытаний. Следует отметить, что, за исключением уточненных прогнозов (срок 21–23 июля) урожайности ярового ячменя, методические прогнозы, составленные в период производственных испытаний, были более успешными, чем составленные в период авторской проверки.

Касательно прогнозов урожайности ярового ячменя, в период производственных испытаний оправдались все методические прогнозы, т.е. абсолютная ошибка прогнозов не превышала допустимую погрешность. В период авторской проверки методический прогноз не оправдался в 2008 году (по обеим моделям). Абсолютная ошибка прогнозов составила 4,6 ц/га, что на 1 ц/га превышает допустимую погрешность. Оправдываемость методических прогнозов в срок 21–23 июля в период оперативных испытаний оказалась несколько ниже (на 1 %), чем при авторских испытаниях. В период производственных испытаний не оправдался прогноз урожайности ярового ячменя, составленный в 2009 году. Прогнозируемая урожайность оказалась ниже фактической. Абсолютная ошибка прогноза составила 2,8–3,1 ц/га, что на 0,8–1,1 ц/га превысило допустимую погрешность ($0,67\Delta\sigma$). Следует заметить, что в 2009 году в Кемеровской области был отмечен рекордный урожай ячменя – 22,4 ц/га. Уточненные прогнозы (21–23 июля), составленные по испытываемому методу, за период авторских испытаний имели высокую оправдываемость (92–95 %) по обеим моделям. В среднем за все годы испытания оправдываемость уточненных прогнозов по испытываемому методу оказалась достаточно высокой – 91–94 %, что по обеим моделям на 4–12 % выше оправдываемости инерционных и климатологических прогнозов.

Исходя из результатов испытаний прогнозов урожайности ярового ячменя (табл. 6) по Кемеровской области по величине допустимой погрешности ($\Delta\sigma$), можно констатировать, что за период испытаний из шести составленных в каждой из групп прогнозов (в первый срок (21–23 июня) и во второй срок (21–23 июля)) по пять прогнозов оправдалось. Оправдываемость прогнозов обеих сроков расчета составила 83 %, что на 33 % выше оправдываемости инерционных и климатологических прогнозов.

В период авторских испытаний неудачными были методические прогнозы урожайности овса, составленные в срок 21–23 июня (по обеим моделям) и в срок 21–23 июля (по модели 1) 2007 г. Прогнозируемая урожайность была ниже фактической на 0,1–0,6 ц/га, и в прогнозе превышена допустимая погрешность ($0,67\sigma$). В среднем за весь период испытаний оправдываемость методических прогнозов урожайности овса, составленных в срок 21–23 июня, составила 88–90 %, составленных в срок 21–23 июля – 91 %, что для уточненных прогнозов и предварительного прогноза по второй модели на 2–7 % выше оправдываемости инерционных и климатологических прогнозов. Предварительные прогнозы урожайности овса по качеству одного уровня с инерционными прогнозами и на 4 % выше климатологических.

Таблица 5

Оправдываемость (%) прогнозов урожайности ярового ячменя и овса по Кемеровской области (по величине относительной ошибки)

Прогнозы по заблаговременности	Методические прогнозы				Инерцион- ные прогнозы	Климато- логические прогнозы
	№ модели	авторские испытания 2006–2008 гг.	производ- ственные испытания 2009–2011 гг.	средняя 2006–2011 гг.	средняя 2006–2011 гг.	
Ячмень						
Предварительный (срок 21–23 июня)	1	84	88	86	87	82
	2	84	89	87	87	82
Уточненный (срок 21–23 июля)	1	95	94	94	87	82
	2	92	91	91	87	82
Овес						
Предварительный (срок 21–23 июня)	1	83	92	88	88	84
	2	82	96	90	88	84
Уточненный (срок 21–23 июля)	1	86	95	91	88	84
	2	89	92	91	88	84

Оправдываемость метода прогноза урожайности овса по величине допустимой погрешности ($\Delta\sigma$) (табл. 6) по обеим моделям в оба срока расчета прогнозов составила 83 %, что на 33 % выше оправдываемости климатологических прогнозов и на одном уровне с инерционными прогнозами. Однако по величине относительной ошибки следует отдать

предпочтение методическим прогнозам, относительная ошибка большинства которых на 1–2 % меньше инерционных и на 3,6–6,7 % меньше климатологических. Только в случае предварительных прогнозов относительная ошибка у методических прогнозов на 0,9 % больше, чем у инерционных.

Решением Технического совета ФГБУ «Новосибирский ЦГМС-РСМЦ» от 10.04.2012 г. рекомендованы к внедрению в оперативную практику в качестве основных методы прогнозов среднеобластной урожайности и валового сбора ярового ячменя на сроки 21–23 июня (модель 2) и 21–23 июля (модель 1) и овса на сроки 21–23 июня (модель 2) и 21–23 июля (модель 2) по территории Кемеровской области.

Результаты испытаний методов по Алтайскому краю

Для территории Алтайского края анализ оправдываемости прогнозов среднекраевой урожайности ярового ячменя по испытываемому методу показал, что менее успешными были предварительные прогнозы (срок 21–23 июня), составленные как в период оперативных, так и в период авторских испытаний. Оправдываемость предварительных прогнозов (табл. 7) в период оперативных испытаний составила 88–89 %, уточненных (21–23 июля) – 92–93 %. Успешность уточненных прогнозов в период авторских испытаний в первый срок составила 88–90 %, во второй срок – 94 %. Оправдываемость методических прогнозов среднекраевой урожайности ярового ячменя за весь период испытаний в первый срок составила 88–90 %, во второй срок – 93–94 %, что на 8–14 % выше оправдываемости инерционных и климатологических прогнозов для предварительных прогнозов и на 13–18% – для уточненных прогнозов.

Таким образом, по оправдываемости методические прогнозы урожайности ярового ячменя имеют явное преимущество перед инерционными и климатологическими прогнозами.

Результаты испытания метода прогноза урожайности ярового ячменя и овса по Алтайскому краю по относительной ошибке ($\Delta\sigma$) представлены в табл. 8.

Оправдываемость методических прогнозов урожайности ярового ячменя на оба срока составила 100 %, что на 33 % превышает оправдываемость инерционных и климатологических прогнозов.

Оценка качества методических прогнозов среднекраевой урожайности овса (табл. 7) показала, что более успешными в период оперативных испытаний были уточненные прогнозы (срок 21–23 июля). Оправдываемость таких прогнозов 93–95 %. Предварительные прогнозы (срок 21–23 июня) среднекраевой урожайности овса в период авторских испытаний имели оправдываемость 93 %, в период оперативных испытаний

оправдываемость снизилась до 86-89 %. При прогнозировании среднекраевой урожайности овса в первый срок по первой модели в 2010 году прогнозируемая урожайность была ниже фактической. Абсолютная ошибка прогноза превысила допустимую погрешность на 0,1 ц/га. В среднем за шестилетний период испытаний оправдываемость методических прогнозов урожайности овса составила: в первый срок 90–91 %, во второй срок – 93–94 %, что на 8–21 % выше оправдываемости инерционных и климатологических прогнозов.

Таблица 7

**Оправдываемость (%) прогнозов урожайности ярового ячменя и овса
по Алтайскому краю (по величине относительной ошибки)**

Прогнозы по заблаговременности	Методические прогнозы				Инерцион- ные прогнозы	Климато- логические прогнозы
	№ модели	авторские испытания 2006-2008 гг.	производ- ственные испытания 2009-2011 гг.	средняя 2006-2011 гг.	средняя 2006-2011 гг.	
Ячмень						
Предварительный (срок 21–23 июня)	1	90	89	90	76	80
	2	88	88	88	76	80
Уточненный (срок 21–23 июля)	1	94	93	94	76	80
	2	94	92	93	76	80
Овес						
Предварительный (срок 21–23 июня)	1	93	86	90	73	82
	2	93	89	91	73	82
Уточненный (срок 21–23 июля)	1	93	95	94	73	84
	2	92	93	93	73	82

Анализ результатов испытания методических прогнозов среднекраевой урожайности овса по величине допустимой погрешности ($\Delta\sigma$), согласно [2], позволил выявить их преимущество перед инерционными и климатологическими прогнозами (табл. 8). Оправдываемость прогнозов по испытываемому методу при предварительном прогнозировании (21–23 июня) составила по первой модели – 83 %, по второй модели – 100 %, что успешнее инерционных и климатологических прогнозов на 33–50 и 16–33 % соответственно. Оправдываемость прогнозов по испытываемому методу во второй срок (21–23 июля) составила по обеим моделям 100 %, инерционного – 50 %, климатологического – 67 %.

Решением Технического совета ФГБУ «Новосибирский ЦГМС-РСМЦ» от 10.04.2012 г. рекомендованы к внедрению в оперативную практику отдела агрометеорологии и агрометпрогнозов ФГБУ «Алтайский ЦГМС» методы среднекраевой урожайности ярового ячменя и овса в сроки 21–23 июня и 21–23 июля для территории Алтайского края.

К достоинствам нового метода следует отнести:

1. Полную автоматизацию расчетов прогнозов, включая выборку данных из автоматизированной системы обработки агрометеорологической информации в Новосибирской области, электронной версии таблиц ТСХ-1 в Кемеровской области и Алтайском крае, а также расчет оценки прогнозов.
2. Возможность метода прогнозировать урожайность ярового ячменя, овса и яровой пшеницы по Новосибирской, Кемеровской областям и Алтайскому краю в весе после доработки.

Список литературы

1. Методы и технологии прогноза валового сбора яровых зерновых культур по отдельным субъектам Сибирского федерального округа, а также прогнозов урожайности и валового сбора яровой пшеницы по основным хлебосеющим районам Омской области (10 районов): отчет о НИР (заключ.): 03201050698 (рук. Т.В. Старостина; исполн. И.Г. Ковригина и др.): ГУ «СибНИГМИ» Росгидромета. – Новосибирск, 2009. – 94 с.
2. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 150 с.
3. *Селянинов Г.Т.* О сельскохозяйственной оценке климата // Труды по сельскохозяйственной метеорологии. – 1928. – Вып. 20. – С. 169–178.
4. *Старостина Т.В.* Методы агрометеорологического прогноза средней областной (краевой) урожайности ярового ячменя в земледельческой зоне Западной Сибири // Труды. ЗапСибНИИ. – 1983. – Вып. 58. – С. 24–36.
5. *Старостина Т.В.* Метод расчета валового сбора ярового ячменя в Новосибирской области и Алтайском крае // Труды ЗапСибНИИ. – 1985. – Вып. 71. – С. 62–68.
6. *Старостина Т.В.* Агрометеорологические условия и изменчивость урожайности ярового ячменя на территории Урала и Сибири // Труды ЗапСибНИИ. – 1987. – Вып. 78. – С. 36–46.

Таблица 2

Результаты испытаний методов прогноза урожайности ярового ячменя и овса по Новосибирской области по величине допустимой погрешности (по $\Delta\sigma$)

Прогнозы по заблаговременности	№ модели	Кол-во прогнозов		Оправдываемость прогнозов, %			Относительная ошибка прогнозов, %		
		составлено	оправдалось	методических	инерционных	климатологических	методических	инерционных	климатологических
Ячмень									
Предварительный (срок 21–23 июня)	1	6	6	100	50	50	8,6	15,8	23,7
	2	6	6	100	50	50	9,0	15,8	23,7
Уточненный (срок 21–23 июля)	1	6	6	100	50	50	7,5	15,8	23,7
	2	6	6	100	50	50	7,6	15,8	23,7
Овес									
Предварительный (срок 21–23 июня)	1	6	5	83	50	50	15,1	20,2	21,7
	2	6	6	100	50	50	10,5	20,2	21,7
Уточненный (срок 21–23 июля)	1	6	6	100	50	50	9,0	20,2	21,7
	2	6	6	100	50	50	9,2	20,2	21,7

Таблица 4

Результаты испытания методов прогноза урожайности яровой пшеницы по районам Новосибирской области (по Δσ)

Район	№ модели	Кол-во прогнозов		Оправдываемость прогнозов, %			Относительная ошибка прогнозов, %		
		составлено	оправдалось	методических	инерционных	климатологических	методических	инерционных	климатологических
Убинский	1	6	6	100	83	33	6,1	15,1	22,2
	2	6	6	100	83	33	7,7	15,1	22,2
Купинский	1	6	6	100	50	50	10,5	44,6	32,2
	2	6	6	100	50	50	11,2	44,6	32,2
Чистоозерный	1	6	6	100	33	67	19,7	48,9	32,2
	2	6	6	100	33	67	18,2	48,9	32,2
Усть-Таркский	1	6	6	100	67	67	8,0	15,9	24,2
	2	6	6	100	67	67	11,4	15,9	24,2
Чановский	1	6	6	100	50	33	13,2	44,9	52,6
	2	6	6	100	50	33	14,1	44,9	52,6
Татарский	1	6	5	83	50	17	8,1	21,9	33,3
	2	6	5	83	50	17	8,0	21,9	33,3
Чулымский	1	6	5	83	83	83	14,2	13,1	9,8
	2	6	5	83	83	83	15,0	13,1	9,8
Карасукский	1	6	5	83	67	67	16,3	19,6	17,4
	2	6	6	100	67	67	11,2	19,6	17,4
Кочковский	1	6	6	100	33	50	7,2	14,8	15,5
	2	6	5	83	33	50	13,3	14,8	15,5
Баганский	1	6	3	50	50	33	19,5	23,1	31,5
	2	6	5	83	50	33	13,4	23,1	31,5

Таблица 6

**Результаты испытаний методов прогноза урожайности ярового ячменя и овса по Кемеровской области
по величине допустимой погрешности (по $\Delta\sigma$)**

Прогнозы по заблаговременности	№ модели	Кол-во прогнозов		Оправдываемость прогнозов, %			Относительная ошибка прогнозов, %		
		составлено	оправдалось	методических	инерционных	климатологических	методических	инерционных	климатологических
Ячмень									
Предварительный (срок 21-23 июня)	1	6	5	83	50	50	13,6	12,6	18,0
	2	6	5	83	50	50	13,4	12,6	18,0
Уточненный (срок 21-23 июля)	1	6	5	83	50	50	5,8	12,6	18,0
	2	6	5	83	50	50	8,5	12,6	18,0
Овес									
Предварительный (срок 21-23 июня)	1	6	5	83	83	50	12,4	11,5	16,0
	2	6	5	83	83	50	10,3	11,5	16,0
Уточненный (срок 21-23 июля)	1	6	5	83	83	50	9,3	11,5	16,0
	2	6	5	83	83	50	9,6	11,5	16,0

Таблица 8

**Результаты испытаний методов прогноза урожайности ярового ячменя и овса по Алтайскому краю
по величине допустимой погрешности (по $\Delta\sigma$)**

Прогнозы по заблаговременности	№ модели	Кол-во прогнозов		Оправдываемость прогнозов, %			Относительная ошибка прогнозов, %		
		составлено	оправдалось	методических	инерционных	климатологических	методических	инерционных	климатологических
Ячмень									
Предварительный (срок 21–23 июня)	1	6	6	100	67	67	10,1	24,0	20,2
	2	6	6	100	67	67	11,8	24,0	20,2
Уточненный (срок 21–23 июля)	1	6	6	100	67	67	6,4	24,0	20,2
	2	6	6	100	67	67	6,8	24,0	20,2
Овес									
Предварительный (срок 21–23 июня)		6	5	83	50	67	10,4	26,8	17,5
	2	6	6	100	50	67	8,7	26,8	17,5
Уточненный (срок 21–23 июля)	1	6	6	100	50	67	5,9	26,8	17,5
	2	6	6	100	50	67	6,8	26,8	17,5

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ МЕТОДА ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ТЕПЛООБЕСПЕЧЕННОСТИ ВЕГЕТАЦИОННОГО ПЕРИОДА ПО ТЕРРИТОРИИ СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Разработка метода прогноза теплообеспеченности вегетационного периода по территории Свердловской области проводилась с учетом потребностей сельскохозяйственных производителей в прогнозах на уровне административных районов и отдельных пунктов. Свердловская область относится к зоне рискованного земледелия. Территория области в основном хорошо обеспечена осадками, лимитирующим фактором для возделывания культур является тепло.

В основе синоптико-статистических методов прогноза лежит предположение о существовании длиннопериодных связей в циркуляции атмосферы всего Северного полушария. Связь между состоянием атмосферы и гидросферы и погодой в том или ином регионе может прослеживаться в течение нескольких сезонов [1, 2, 5].

При разработке метода прогноза теплообеспеченности вегетационного периода по территории Свердловской области был применен метод разложения метеорологических полей по естественным ортогональным составляющим [3]. В качестве предиктантов использовались первый и второй коэффициенты разложения по естественным ортогональным составляющим поля значений отклонений сумм температуры воздуха выше 10 °С от средних многолетних значений по одиннадцати метеорологическим станциям Свердловской области за период с 1968 по 2008 год:

$$A_{i,j} = \sum_{k=1}^{11} \Delta T_{i,k} \cdot \varphi_{j,k} ,$$

где $A_{i,j}$ – коэффициенты разложения поля отклонений сумм температуры выше 10 °С; $\Delta T_{i,k}$ – ежегодные значения отклонений сумм температуры воздуха выше 10 °С на станциях; $\varphi_{j,k}$ – собственные векторы ковариационной матрицы.

Первые два коэффициента разложения поля отклонений сумм температуры выше 10 °С учитывают 93 % суммарной дисперсии поля отклонений сумм температуры выше 10 °С.

Потенциальными предикторами являются средние месячные значения геопотенциала на уровне 500 гПа в узлах регулярной десятиградусной сетки в пределах Северного

полушария и температуры поверхности воды Атлантического океана в 51 узле десятиградусной сетки за месяцы, предшествующие периоду вегетации. Выбор потенциальных предикторов для долгосрочного прогноза теплообеспеченности вегетационного периода основан на современных представлениях о факторах, влияющих на формирование циркуляции атмосферы в этот период, а также реальной возможности получения значений параметров циркуляции в оперативном режиме к моменту составления прогноза (прогноз составляется в середине марта).

Для расчета первого коэффициента разложения использовались данные о средних месячных значениях геопотенциала на уровне 500 гПа с июня по декабрь года, предшествующего году прогноза, и за январь и февраль прогнозируемого года, а также средние месячные значения температуры поверхности Атлантического океана за февраль прогнозируемого года.

Для расчета второго коэффициента разложения использовались данные о средних месячных значениях геопотенциала на уровне 500 гПа за январь прогнозируемого года и средние месячные значения температуры поверхности Атлантического океана за июнь–октябрь года, предшествующего году прогноза, и за январь прогнозируемого года,

Для построения уравнений использовались разности средних месячных значений геопотенциала в соседних узлах десятиградусной регулярной сетки и значения температуры поверхности воды Атлантического океана в узлах десятиградусной сетки.

Корреляционные связи между предикторами и предиктантами рассчитываются заново для каждого последующего года с учетом вновь поступившей информации.

Для расчета прогнозируемой теплообеспеченности по территории Свердловской области необходимо от рассчитанных по уравнениям первому и второму коэффициентам разложения перейти к прогнозируемым отклонениям от тренда и далее – к прогнозируемым суммам температур выше 10 °С для каждой из 11 станций:

$$\Delta T_{i+1,k} = A_{i+1,1} \varphi_{k,1} + A_{i+1,2} \varphi_{k,2},$$
$$T_{i+1,k} = \bar{T}_k + \Delta T_{i+1,k} \cdot \bar{T}_k.$$

Для составления прогнозов ожидаемой теплообеспеченности вегетационного периода разработан пользовательский интерфейс, позволяющий в значительной мере упростить работу агрометеоролога-прогнозиста. На рисунке показаны основные меню программного комплекса:

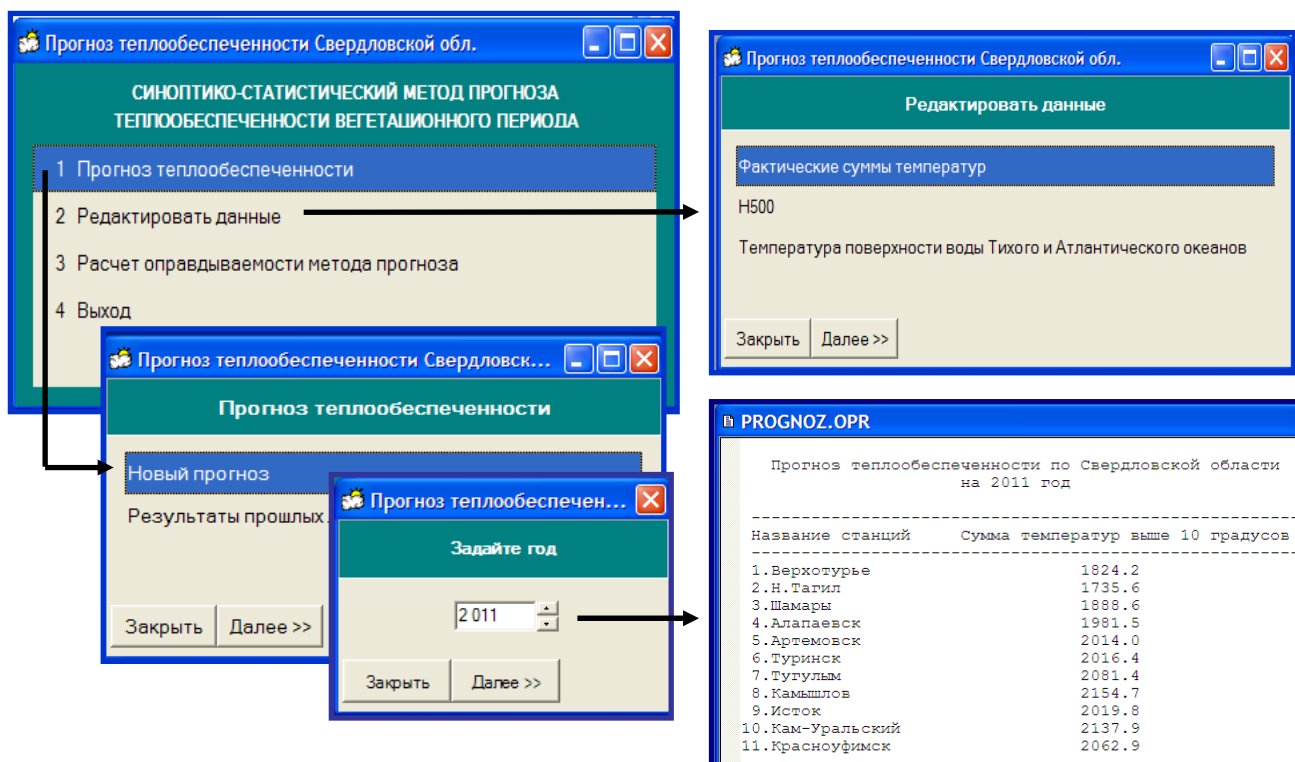


Рисунок. Меню программного комплекса.

Расчет ожидаемой теплообеспеченности вегетационного периода проводится в два этапа:

- в пункте меню «Подготовка данных» файлы исходных данных для проведения расчетов пополняются вновь поступившей информацией;
- в пункте меню «Прогноз теплообеспеченности» рассчитываются прогностические значения теплообеспеченности по 11 пунктам Свердловской области.

По мере поступления данных о фактической теплообеспеченности в пункте меню «Расчет оправдываемости метода прогноза» можно в автоматизированном режиме рассчитать оправдываемость метода и сравнить с оправдываемостью инерционного и климатологического методов прогнозов.

В 2009–2011 гг. в отделе агрометеорологических прогнозов и агрометеорологии ФГБУ «Свердловский ЦГМС-Р» проводились производственные испытания метода долгосрочного прогноза теплообеспеченности вегетационного периода по территории Свердловской области.

Оценка качества испытываемой методики проводилась в соответствии с требованиями [4], результаты представлены в табл. 1–3.

Оправдываемость испытываемого метода составила 80–90 % (по Нижнему Тагилу – 70 %), инерционного прогноза 50–80 %, климатологического 40–90 % (табл. 1). Ошибка

прогнозов по испытываемому методу по всем 11 станциям Свердловской области за годы авторских и производственных испытаний (2002–2011 гг.) составила 1,9–5,7 %, что меньше ошибок инерционного и климатологического прогнозов – 3,0–8,4 % (табл. 2).

Таблица 1

**Оправдываемость (%) прогнозов теплообеспеченности вегетационного периода
по территории Свердловской области за период авторских (2002–2008 гг.)
и производственных (2009–2011 гг.) испытаний**

Метеостанции	Оправдываемость, %		
	испытываемый метод	инерционный	климатологический
Верхотурье	90	70	50
Нижний Тагил	70	60	40
Алапаевск	90	70	70
Артемковский	90	60	80
Туринск	90	80	90
Тугулым	90	70	60
Камышлов	90	70	60
Исток	80	60	70
Каменск-Уральский	90	60	70
Красноуфимск	90	50	70
Шамары	90	70	70

Таблица 2

**Средняя относительная ошибка (%) оправдавшихся прогнозов по территории Свердловской
области за период авторских (2002–2008 гг.) и производственных (2009–2011 гг.) испытаний**

Метеостанции	Средняя относительная ошибка, %		
	испытываемый метод	инерционный	климатологический
Верхотурье	3,0	5,6	5,2
Нижний Тагил	5,7	5,8	7,3
Алапаевск	2,0	4,3	5,9
Артемковский	3,2	3,9	5,8
Туринск	2,2	4,1	5,9
Тугулым	1,9	3,8	5,1
Камышлов	2,7	4,0	4,6
Исток	5,0	3,7	6,8
Каменск-Уральский	3,2	3,1	6,3
Красноуфимск	4,9	3,0	4,7
Шамары	3,8	4,0	8,4

Оправдываемость прогнозов за годы производственных испытаний (2009–2011 гг.) составила 79–99,9 %, относительная ошибка 0,1–21 %. В 2009 г. прогноз теплообеспеченности вегетационного периода не оправдался, абсолютная ошибка прогноза по всем 11

метеорологическим станциям была выше допустимой ошибки ($\sigma_{\text{доп.}} = \sigma$), в 2010–2011 гг. оправдываемость прогноза была высокой (табл. 3).

Таблица 3

**Результаты производственных испытаний метода долгосрочного прогноза
теплообеспеченности вегетационного периода по территории Свердловской области**

Метеостанции	Год испытания	Сумма положительных температур выше 10 °С, за период		Относи- тельная ошибка, %	Оправды- ваемость, %
		прогноз	фактическая		
Верхотурье	2009	1594,6	1975,9	19,3	80,7
	2010	1878,7	2014,0	6,7	93,3
	2011	1839,4	1873,1	1,8	98,2
Нижний Тагил	2009	1548,9	1947,0	20,4	79,6
	2010	1696,3	1983,0	14,5	85,5
	2011	1537,6	1806,3	14,9	85,1
Алапаевск	2009	1708,8	2063,1	17,2	82,8
	2010	2027,7	2104,0	3,6	96,4
	2011	1968,2	1950,3	0,9	99,1
Артемовский	2009	1727,2	2061,3	16,2	83,8
	2010	2093,7	2097,0	0,2	99,8
	2011	2091,5	1959,3	6,7	93,3
Туринск	2009	1738,5	2059,9	15,6	84,4
	2010	2067,8	2065,0	0,1	99,9
	2011	2021,6	1960,0	3,1	96,9
Тугулым	2009	1785,7	2261,2	21	79,0
	2010	2146,0	2188,0	1,9	98,1
	2011	2108,6	2008,7	5,0	95,0
Камышлов	2009	1851,1	2155,1	14,1	85,9
	2010	2254,7	2307,0	2,3	97,7
	2011	2276,1	2222,2	2,4	97,6
Исток	2009	1737,6	2032,9	14,5	85,5
	2010	2121,9	2115,0	0,3	99,7
	2011	2179,1	1966,8	10,8	89,2
Каменск-Уральский	2009	1834,1	2162,7	15,2	84,8
	2010	2252,9	2272,0	0,8	99,2
	2011	2299,2	2186,7	5,1	94,9
Красноуфимск	2009	1774,4	2050,0	13,4	86,6
	2010	2149,4	2209,0	2,7	97,3
	2011	2148,2	1934,6	11,0	89,0
Шамары	2009	1645,0	1997,2	17,6	82,4
	2010	1945,6	2137,7	9,0	91,0
	2011	1903,7	1907,6	0,2	99,8

Рекомендации о внедрении

Технический совет Департамента Росгидромета по УФО от 27.03.2012 г., заслушав и обсудив доклад Н.М. Черкашенко, агрометеоролога Отдела агрометпрогнозов и агрометеорологии ФГБУ «Свердловский ЦГМС-Р», об испытании метода долгосрочного прогноза теплообеспеченности вегетационного периода по территории Свердловской области постановил:

– учитывая хорошие результаты испытания нового метода, его достаточную заблаговременность (прогноз составляется 15 марта) и автоматизацию, рекомендовать использовать его в качестве консультативного при составлении докладов и справок для обслуживания сельского хозяйства.

Список литературы

1. *Лебедева В.М.* Метод долгосрочного прогноза теплообеспеченности вегетационного периода // Метеорология и гидрология. – 2005. – № 9. – С. 93–99.
2. *Лебедева В.М.* Долгосрочный синоптико-статистический метод прогноза валового сбора зерновых культур по федеральным округам и России в целом // Труды ГУ «ВНИИСХМ». – 2010. – Вып. 37. – С. 69–81.
3. *Мещерская А.В., Руховец Л.В., Юдин М.И., Яковлева Н.И.* Естественные составляющие метеорологических полей. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 200 с.
4. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. – М.: Госкомгидромет, 1991. – С. 98–107.
5. *Русакова Т.И., Лебедева В.М., Грингоф И.Г., Шкляева Н.М.* Современная технология поэтапного прогнозирования урожайности и валового сбора зерновых культур // Метеорология и гидрология. – 2006. – № 7. – С. 101–108.

МЕТОД ПРОГНОЗА СРОКОВ ОКОНЧАТЕЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ ПРИПАЯ ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТЬЮ 15–30 СУТОК В РАЙОНАХ ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧУКОТСКОГО МОРЯ

Метод прогноза разработан в 2007 году согласно плану тематической работы. Метод физико-статистический, при его разработке использована автоматическая информационная программа с условным названием «Пегас», ранее успешно использованная для прогнозов сроков разрушения припая в Восточно-Сибирском море [1]. Метод базируется на данных искусственных спутников Земли (ИСЗ), обзорных и региональных ледовых картах ФГБУ «ААНИИ» и наблюдениях полярных станций. Припайная зона чукотского побережья разделена на три района, отличающихся некоторыми режимными особенностями в период формирования и разрушения припая. Метод разрушения припая разработан для каждого района.

Характеристика припая в период нарастания

Мониторинг за состоянием припая в период его формирования и разрушения производится с использованием ледовых карт, которые строятся в ФГБУ «ААНИИ» по данным ИСЗ с дискретностью 7–10 суток. При необходимости используются непосредственно спутниковые снимки. По ледовым картам еженедельно определяются площади припая в границах районов арктических морей и ширина припая на створах. Схема створов для чукотского побережья представлена на рис. 1.

Из-за глубоководности прибрежной зоны припай в юго-западной части Чукотского моря не достигает большого развития. Его становление в среднем приходится на конец октября – начало ноября. Позже всего припай образуется у крайнего восточного побережья Чукотки. Приращение ширины припая на створах характеризует развитие припая в период его формирования (рис. 2). Как можно видеть на рис. 2, наиболее интенсивно припай нарастает в период с ноября по январь. К февралю продвижение границы припая в мористые районы замедляется, и в марте-апреле припай у чукотского побережья достигает максимального развития.

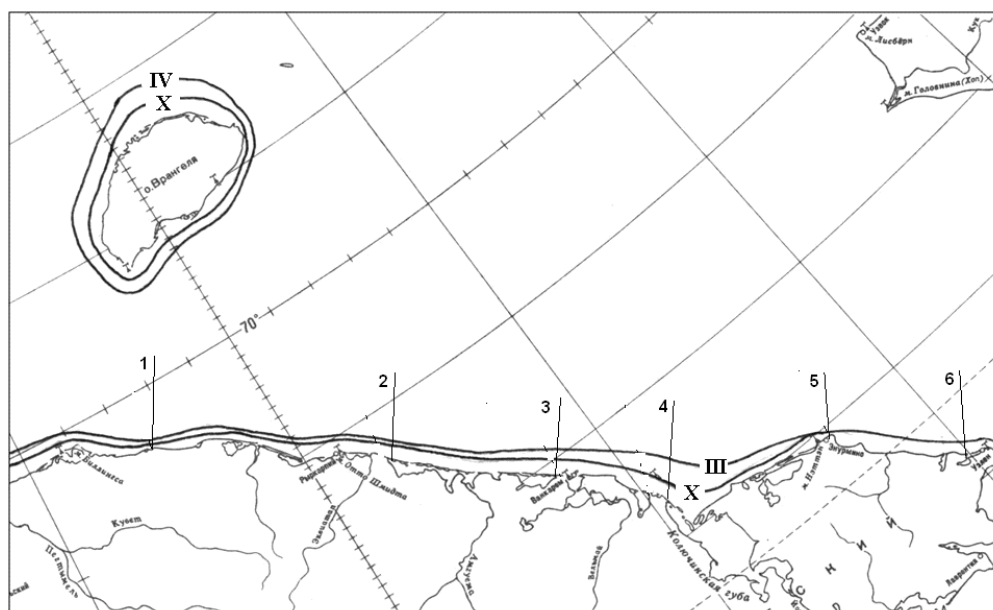


Рис. 1. Среднее положение границ припая в период его нарастания в юго-западной части Чукотского моря по данным ИСЗ за период 1980–2011 гг. и положение створов.

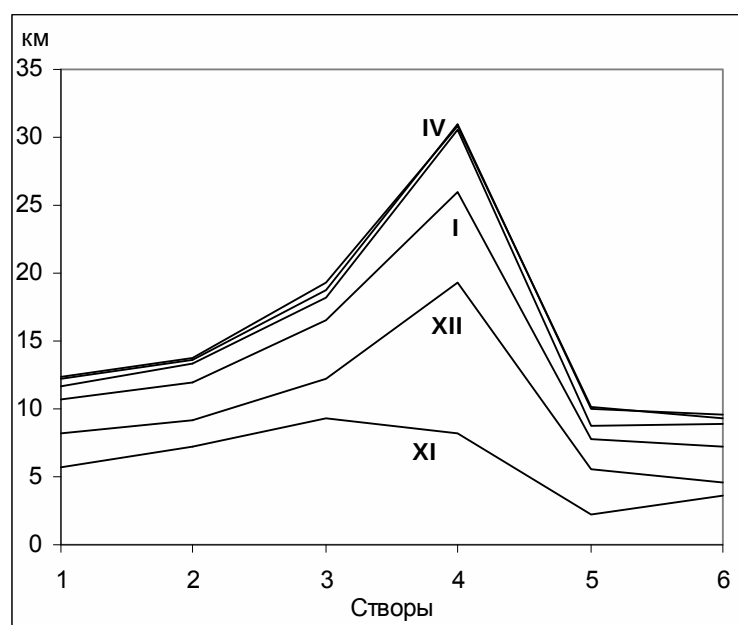


Рис. 2. Изменения средней ширины припая, км, на створах у чукотского побережья в период формирования припая (римские цифры на рисунке – месяцы).

В марте ширина припая составляет в среднем около 12 км у мыса Шмидта и может изменяться в пределах 5–20 км. Далее на восток, в районе Колючинской губы, средняя ширина припая увеличивается до 30 км, где в некоторые годы может достигать 70 км. Восточнее средняя ширина припая уменьшается до 10 км.

Площадь припая у чукотского побережья, достигнув в начале ноября около 7 тыс. км², медленно увеличивается и в марте составляет около 11 тыс. км², сохраняясь в этих размерах до начала разрушения.

В годы, благоприятные для развития припая, его площадь более чем вдвое превышает среднюю величину (табл. 1).

Таблица 1

Средние и экстремальные площади припая в период нарастания в юго-западной части Чукотского моря в середине месяца по данным ИСЗ за период 1980–2003 гг., тыс. км²

Характеристика площади	Месяцы							
	X	XI	XII	I	II	III	IV	V
Средняя	5,7	7,3	7,6	9,8	10,6	10,9	10,9	10,9
Максимальная	8,8	14,3	15,5	17,2	18,7	23,4	23,4	23,4
Минимальная	2,3	2,5	2,0	4,7	5,1	5,1	5,1	5,1

В среднем площадь чукотского припая в конце периода развития составляет 6 % от площади юго-западной части моря. В годы максимального развития припай может занимать 13 % площади моря, а в годы наименьшего развития всего 3 %.

Характеристика припая в период разрушения

Начало разрушения припая в юго-западной части Чукотского моря начинается в южной части моря во второй декаде мая, когда под влиянием беринговоморских вод происходит раннее очищение моря. В среднем в крайнем восточном районе чукотского побережья припай разрушается в середине июня, в западных районах – в начале июля. Исключение составляет Колючинская губа, где в отдельные годы припай может сохраняться до середины июля.

На рис. 3 схематично показано изменения положения границ припая у чукотского побережья по данным о ширине припая на створах.

Анализ многолетних наблюдений за разрушением припая у чукотского побережья позволил выделить три района, отличающихся характером и сроками его разрушения: район **I** – участок мыс Якан – мыс Ванкарем, район **II** – мыс Ванкарем – о. Колючин, район **III** – мыс Сердце Камень – Уэлен. На рис. 3 также можно выделить эти районы: район **I** – между створами 1-3, район **II** – между створами 3–5 и район **III** – между створами 5–6, различающиеся по скорости смещения границ в период разрушения.

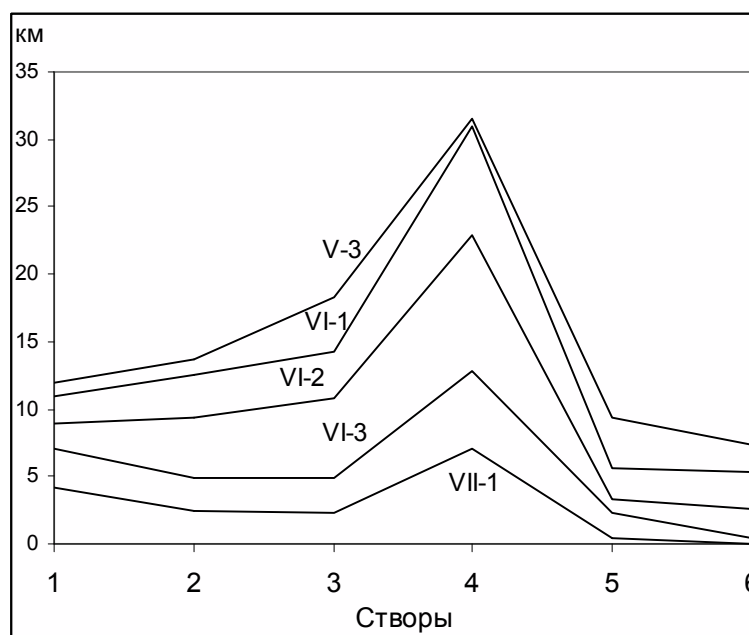


Рис. 3. Изменения средней ширины припая, км, на створах у чукотского побережья в период разрушения припая (цифры на графиках означают месяц-декаду).

Как видно из табл. 2, многолетний размах сроков окончательного разрушения припая у чукотского побережья составляет от полутора до двух месяцев. Поэтому критерии для методической и прогностической оценки в долях среднего квадратического отклонения (σ) также значительны – 9–12 суток.

Таблица 2

Сроки окончательного разрушения припая в районах чукотского побережья и их статистические характеристики за период 1980-2012 гг.

Характеристики сроков	Районы		
	I	II	III
Средние	3.07	1.07	17.06
Поздние	27.07	27.07	15.07
Ранние	6.06	15.06	16.05
σ , сутки	15	13	13
$0,674\sigma$, сутки	10	8.8	8,8
$0,8\sigma$, сутки	11,8	10,5	10,4

Разработка метода прогноза

Как уже упоминалось, для разработки метода прогноза сроков окончательного разрушения припая у чукотского побережья использована автоматическая информационная программа «Пегас», позволяющая осуществлять выбор наиболее информативных

предикторов, как из рядов точечных измерений (данных полярных станций), так и из полей элементов (давления, температуры), представленных в узлах сеточной области.

Из стандартных процедур программа позволяет оценивать коэффициентами корреляции статистическую связь; по заданному критерию игнорировать или учитывать аргумент; выбирать наиболее значимые аргументы; на основе элементарного дискриминантного анализа проводить обобщение всей информации и рассчитывать обобщенный показатель P .

Обобщенный показатель P представляет собой сумму коэффициентов влияния K :

$$P = \sum K_i,$$

где $K = U \cdot r^2$; U – расчетное значение функции по уравнению регрессии; r^2 – квадрат частного коэффициента корреляции.

Аналогично получаются обобщенные показатели для нескольких полей. В этом случае суммируются коэффициенты влияния характеристик всех анализируемых полей. Окончательное прогностическое уравнение имеет вид

$$U = a \sum_1^n P + b,$$

где n – число учитываемых информационных полей.

Для учета атмосферного давления используется сеточная область, приведенная на рис. 4. Программа «Пегас» находит наиболее информативные створы для расчета разностей атмосферного давления для учета воздушных переносов, влияющих на разрушение припая посредством как динамического, так и термического воздействия вследствие адвекции тепла или холода в районы припайной зоны.

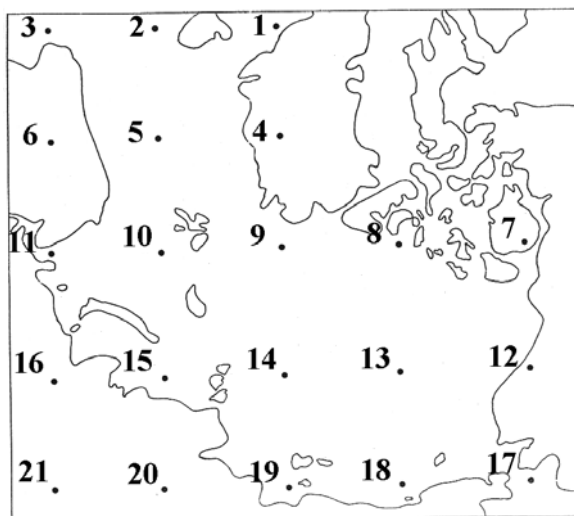


Рис. 4. Схема центров сеточной области для учета атмосферного давления

При выборе информативных показателей (предикторов) для прогноза сроков разрушения припая необходимо учитывать наиболее ранние сроки для обеспечения необходимой заблаговременности прогноза, равной 15–30 суткам. Как видно из рис. 5, эти показатели необходимо использовать не позже апреля-мая, так как в начале июня, а в восточном районе иногда в мае, происходит разрушение припая.

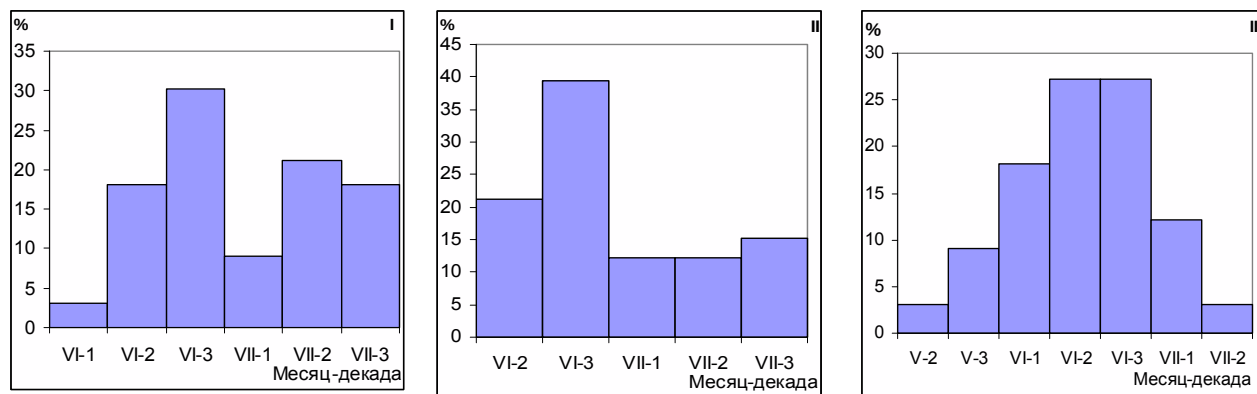


Рис. 5. Гистограммы распределения сроков разрушения припая в районах чукотского побережья за период 1980–2012 гг.

Для нахождения информативных показателей и построения прогностических уравнений для сроков взлома припая в каждом из районов чукотского побережья были использованы поля среднемесячного приземного атмосферного давления с января по май, ряды среднемесячной температуры воздуха за апрель–май на полярных станциях «Шмидт», «Ванкарем», «Уэлен», а также ширина припая на репрезентативных для районов створах.

Результаты корреляционного анализа сроков взлома припая с различными показателями для каждого района сведены в табл. 3.

В результате преобразования информативных показателей программа рассчитала коэффициенты (А и В) и обобщенный показатель (Р) для результирующих корреляционных уравнений для каждого из районов и произвела расчет по этим уравнениям для каждого года рядов сроков взлома припая в районах. Пример расчета для района I приведен в табл. 4. Таблица содержит коэффициенты корреляции результирующего прогностического уравнения (R), квадрат коэффициента корреляции (R^2), характеризующий степень учета уравнением изменчивости сроков взлома припая и обеспеченность расчетного уравнения.

Уравнения для прогноза сроков разрушения припая (D) для каждого района, полученные в результате расчетов по программе «Пегас», представлены в табл. 5 и 6. Таблицы отличаются критериями (0,8σ и 0,674 σ) для методической оценки разработанного прогноза и их эффективности.

Таблица 3

**Результаты анализа информативности различных показателей для прогнозирования сроков
взлома припая в районах чукотского побережья**

Район I			
Массив параметров	Месяц	Информационный створ/станция	Коэффициенты корреляции
Давление	Январь	9	0,45
	Февраль	14–20	–0,37
	Март	13–16	–0,53
	Апрель	12–18	–0,46
	Май	11–17	0,57
Температура	Апрель	Ванкарем	–0,40
	Май		–0,64
Температура	Апрель	Шмидта	–0,52
	Май		–0,71
Температура	Апрель	Уэлен	–0,28
	Май		–0,56
Ширина припая	Май	Створ 2	0,37
Район II			
Давление	Январь	6–11	0,48
	Февраль	14–20	0,34
	Март	2–21	–0,56
	Апрель	12–18	–0,47
	Май	11–17	0,61
Температура	Апрель	Ванкарем	–0,42
	Май		–0,73
Температура	Апрель	Шмидта	–0,59
	Май		–0,77
Температура	Апрель	Уэлен	–0,24
	Май		–0,64
Ширина припая	Май	Створ 4	0,31
Район III			
Давление	Январь	14–18	0,46
	Февраль	8–14	0,31
	Март	11–12	0,63
	Апрель	17–18	–0,50
	Май	16–17	0,52
Температура	Апрель	Ванкарем	–0,24
	Май		–0,63
Температура	Апрель	Шмидта	–0,38
	Май		–0,57
Температура	Апрель	Уэлен	–0,28
	Май		–0,32
Ширина припая	Май	Створ 6	0,51

Таблица 4

Пример расчета по прогностическому уравнению для района I

Год	SR	АО	A	R	R2	Фактич	Расчет	Раз-сть
1980	8.626	-48.068	11.400	.848	.720	42.000	50.265	-8.265
1981	6.379					30.000	24.649	5.351
1982	8.924					51.000	53.658	-2.658
1983	8.510					55.000	48.947	6.053
1984	8.393					57.000	47.608	9.392
1985	9.095					55.000	55.613	-.613
1986	6.933					27.000	30.969	-3.969
1987	7.697					42.000	39.673	2.327
1988	8.357					43.000	47.198	-4.198
1989	7.116					42.000	33.051	8.949
1990	5.478					26.000	14.384	11.616
1991	6.811					29.000	29.577	-.577
1992	6.726					21.000	28.602	-7.602
1993	7.117					31.000	33.059	-2.059
1994	8.509					57.000	48.928	8.072
1995	7.366					43.000	35.900	7.100
1996	6.387					45.000	24.739	20.261
1997	6.354					22.000	24.371	-2.371
1998	8.824					55.000	52.518	2.482
1999	7.463					33.000	37.008	-4.008
2000	6.606					25.000	27.241	-2.241
2001	6.788					27.000	29.311	-2.311
2002	5.382					16.000	13.282	2.718
2003	5.981					18.000	20.111	-2.111
2004	6.490					22.000	25.921	-3.921
2005	6.901					23.000	30.597	-7.597
2006	6.840					22.000	29.906	-7.906
2007	6.449					20.000	25.451	-5.451
2008	6.955					19.000	31.217	-12.217
2009	5.293					6.000	12.276	-6.276
2010	6.829					27.000	29.780	-2.780
2011	6.704					24.000	28.360	-4.360
2012	7.097					16.000	32.832	-16.832

Таблица 5

Оценка обеспеченности уравнений для прогноза сроков взлома припая в районах чукотского побережья по критерию $0,8\sigma$ для периода 1980–2007 гг.

Район	Прогностические уравнения	0,8σ, сутки	Обеспеченность, %		Эффект. %
			метод.	природ.	
I – м. Якан–м. Ванкарем	$D = 10,530P - 44,590$	11	93	64	29
II – м. Ванкарем–о. Колючин	$D = 8,599P - 36,233$	10	89	58	31
III – м. Сердце Камень–Уэлен	$D = 13,513P - 29,540$	10	93	68	25

Таблица 6

Оценка обеспеченности уравнений для прогноза сроков взлома припая в районах чукотского побережья по критерию $0,674\sigma$ для периода 1980–2007 гг.

Район	Прогностические уравнения	0,674σ, сутки	Обеспеченность, %		Эффект. %
			метод.	природ.	
I – м. Якан–м. Ванкарем	$D = 10,530P - 44,590$	10	86	54	32
II – м. Ванкарем–о. Колючин	$D = 8,599P - 36,233$	9	86	50	36
III – м. Сердце Камень–Уэлен	$D = 13,513P - 29,540$	9	93	64	29

Как можно видеть из табл. 5 и 6, методическая обеспеченность прогностических уравнений сроков разрушения припая на зависимых рядах для обоих критериев оценки достаточно высокая – в пределах 86–93 % при эффективности, в сравнении с природной обеспеченностью, равной 29–36 %.

Результаты испытаний метода прогноза для периода 2008–2012 гг.

Разработанные прогностические уравнения были использованы для прогнозов сроков взлома припая в период 2008–2012 гг. Результаты представлены в табл. 7 и 8.

Таблица 7

Оценка оправдываемости прогнозов сроков окончательного разрушения припая за период 2008–2012 гг. (критерий 0,8σ)

Год	Район I				Район II				Район III			
	Прог- ноз	Факт	Ошиб- ка, сутки	Опр., %	Прог- ноз	Факт.	Ошиб- ка, сутки	Опр., %	Прог- ноз	Факт.	Ошиб- ка, сутки	Опр., %
2008	29.06	19.06	10	100	02.07	22.06	10	100	08.06	28.05	10	100
2009	11.06	06.06	5	100	14.06	15.06	–1	100	24.05	16.05	8	100
2010	30.06	27.06	3	100	29.06	25.06	4	100	17.06	10.06	7	100
2011	01.07	24.06	7	100	24.06	23.06	1	100	13.06	13.06	0	100
2012	02.07	16.06	16	0	01.07	16.06	15	0	20.06	08.06	12	0
Среднее				80				80				80

Таблица 8

Оценка оправдываемости прогнозов сроков окончательного разрушения припая за период 2008–2012 гг. (критерий 0,674σ)

Год	Район I				Район II				Район III			
	Прог- ноз	Факт	Ошиб- ка, сутки	Опр., %	Прог- ноз	Факт.	Ошиб- ка, сутки	Опр., %	Прог- ноз	Факт.	Ошиб- ка, сутки	Опр., %
2008	29.06	19.06	10	100	02.07	22.06	10	0	08.06	28.05	10	0
2009	11.06	06.06	5	100	14.06	15.06	–1	100	24.05	16.05	8	100
2010	30.06	27.06	3	100	29.06	25.06	4	100	17.06	10.06	7	100
2011	01.07	24.06	7	100	24.06	23.06	1	100	13.06	13.06	0	100
2012	02.07	16.06	16	0	01.07	16.06	15	0	20.06	08.06	12	0
Среднее				80				60				60

Как видно из табл. 7, при оценке оправдываемости прогноза по критерию 0,8σ не оправдался прогноз в 2012 г., когда во всех районах наблюдалось аномально раннее разрушение припая, обусловленное краткосрочным выносом тепла и ранним развитием

Чукотской заприпайной прогалины. В среднем за пять лет по всем районам оправдываемость прогноза составила 80 %.

При более строгой оценке прогноза по критерию $0,674\sigma$ в районе I средняя оправдываемость за пять лет осталась на уровне 80 %, в двух других районах – понизилась до 60 %.

Разработанный метод долгосрочного прогноза сроков разрушения припая в районах Чукотского моря может быть уточнен краткосрочными прогнозами, методики которых изложены в [2].

Список литературы

1. Карклин В.П., Карелин И.Д., Юлин А.В. Метод прогноза сроков окончательного разрушения припая в Восточно-Сибирском море заблаговременностью до одного месяца // Информационный сборник № 38. – 2011. – С. 88–103.

2. Горбунов Ю.А., Карелин И.Д., Кузнецов И.М., Лосев С.М., Соколов А.Л. Основы физико–статистических методов ледовых прогнозов и расчетов для арктических морей заблаговременностью до 30 суток. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 288 с.

**ГИДРОДИНАМИКО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ПРОГНОЗА
ШКВАЛОВ И ОЧЕНЬ СИЛЬНОГО ВЕТРА
В ГРАДАЦИИ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД
С ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТЬЮ 12–36 Ч
ПО ВЫХОДНЫМ ДАННЫМ РЕГИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ
ДЛЯ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ**

Введение

На протяжении более 20 лет в ФГБУ «Гидрометцентр России» развивается направление статистического прогнозирования шквалов. Некоторые из разработанных методов внедрены в оперативную практику прогнозирования.

Разработанный в ФГБУ «Гидрометцентр России» автоматизированный (основанный на статистической интерпретации прогнозов полусферной неадиабатической модели [1]) метод прогноза дневных максимальных скоростей ветра (не менее 20 м/с), связанных с активной конвекцией, заблаговременностью 12 и 24 ч решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета от 17.03.1993 г. рекомендован к использованию в качестве вспомогательного материала в оперативной практике Северо-Западного, Северо-Кавказского, Верхне-Волжского, Башкирского УГМС и Гидрометцентра России [3]. Прогнозы в оперативном режиме передавались в прогностические подразделения этих УГМС в виде телеграмм через ГРМЦ Росгидромета два раза в сутки (расчет производился в 00 и 12 ч ВСВ) до 2006 г. включительно.

Метод автоматизированного прогноза максимальной скорости ветра (≥ 25 м/с), связанного с активной конвекцией, с заблаговременностью 12 и 24 ч Ученым советом Гидрометцентра России на заседании 20.03.1996 г. рекомендован к внедрению в оперативную практику Гидрометцентра России в качестве вспомогательного [2].

Метод автоматизированного гидродинамико-статистического прогноза опасных летних ветров с заблаговременностью 12 и 36 ч, а также летних ветров скоростью 20 м/с и более на текущий день решением Техсовета УГМС Республики Татарстан от 15 февраля 2005 г. внедрен как консультативный к синоптическому методу [5].

В последние годы продолжилось развитие данного подхода к прогнозу шквалов на другой гидродинамической модели.

Адаптация гидродинамико-статистической модели прогноза сильных и опасных летних ветров, включая шквалы и смерчи, к выходным полям региональной модели Гидрометцентра России

В связи с демонтажом в Гидрометцентре России ЭВМ COMPAREX используемая оперативная модель краткосрочного прогноза погоды – полусферная гидродинамическая модель по полным уравнениям (автор – Л.В. Беркович) – была заменена в данных исследованиях новой оперативной гидродинамической моделью, функционирующей на действующих ЭВМ, а именно региональной моделью Гидрометцентра России с горизонтальным разрешением 75х75 км (автор – В.М. Лосев [4]). В 2007–2008 гг. проводилась адаптация статистической модели прогноза сильных и опасных летних ветров, включая шквалы и смерчи, к выходной продукции региональной модели. Были уточнены дискриминантные функции $F_1(X)$ и $F_2(X)$ для прогноза скорости ветра, соответственно, двух градаций: $V \geq 20$ м/с и $V \geq 25$ м/с и определяемые по ним прогнозируемые пороговые вероятности $P_1(X)$ и $P_2(X)$ возникновения явления [6, 7].

Гидродинамические прогнозы полей метеоэлементов региональной модели с разрешением 75х75 км рассчитываются в утреннем сеансе за срок 00 ч ВСВ и в дневном сеансе – за срок 12 ч ВСВ с заблаговременностью 12, 24, 36 и 48 ч. В эти же сроки по прогностическим полям в узлах модельной сетки рассчитываются значения дискриминантных функций $F_1(X)$ и $F_2(X)$. Предикторами прогностической зависимости, как и в ранее полученных дискриминантных функциях, являются прогностические поля геопотенциала на уровне 1000 гПа, приземной температуры, скорости ветра на уровне 700 гПа и температуры на уровне 300гПа, а также рассчитанные на основе модельных полей влажность у земли (точка росы), гидродинамическая неустойчивость (индекс Вайтинга) и модуль горизонтального градиента температуры у земли.

Значения вероятностей (в процентах) $P_1(X)$ и $P_2(X)$, зависящие, соответственно, от значений $F_1(X)$ и $F_2(X)$, рассчитываются также в узлах декартовой сетки региональной модели. Они записываются в базу данных RGPR ФГБУ «Гидрометцентр России» как поля вероятностей K99R012D-048D (для $P_1(X)$) и W99R012D-048D (для $P_2(X)$). Эти поля по просьбе пользователей передаются в настоящее время также и на FTP-сервер ФГБУ «Гидрометцентр России».

После получения полей вероятностей из базы RGPR с помощью графического пакета ИЗОГРАФ (автор – Ю.В. Алферов) на бланке карты ЕТР можно расчертить изолинии равных вероятностей. Прогнозируемые области сильного и опасного ветра выделяются по задаваемой для каждой заблаговременности пороговой вероятности $P_{\text{пор}}$. Эмпирически выбранное значение пороговой вероятности для прогнозов с заблаговременностью 12 ч скорости ветра $V \geq 20$ м/с равно $P_{\text{пор}} = 60 \%$, скорости ветра $V \geq 25$ м/с – $P_{\text{пор}} = 65 \%$. Значения пороговой вероятности для прогнозов скорости ветра $V \geq 25$ м/с заблаговременностью 24 и 36 ч были выбраны равными $P_{\text{пор}} = 60 \%$.

В результате авторской проверки в 2009 году получены удовлетворительные результаты оценки прогнозов сильных шквалов и опасного ветра скоростью 25 м/с и более [6]. Метод прогноза шквалов и очень сильного ветра в градации опасных явлений по выходным данным региональной модели с заблаговременностью 12–36 ч был включен в План испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиофизических методов прогноза Росгидромета на 2010-2011 гг. Испытания для территории Центрального федерального округа (ЦФО) ЕТР проводились в лаборатории испытаний Гидрометцентра России под руководством А.Н. Багрова.

Оценка прогнозов шквалов и порывов ветра с учетом допусков по скорости ветра, согласно Наставлению [11], проводилась в двух градациях ($V \geq 20$ м/с и $V \geq 25$ м/с) на текущий день с заблаговременностью 12 ч (счет в 00 ч ВСВ). Оценивались прогнозы, как уже было сказано, для ЦФО – по входящим в него семнадцати областям, а также по узлам модельной сетки (17x18 узлов). В пределах территории области выбирался из прогнозов по узлам сетки прогноз наиболее опасного ветра и сравнивался с наблюдаемой скоростью наиболее опасного ветра на метеорологических станциях и, согласно журналу фиксирования опасных явлений, в пунктах, где метеорологические наблюдения не ведутся.

Результаты испытаний методов прогноза сильных шквалов и максимальных порывов летнего ветра по территории ЦФО на основе выходных данных региональной модели Гидрометцентра России

При прогнозе сильных шквалов и опасных порывов ветра скоростью 20 м/с и более и 25 м/с и более в заданной области прогноз давался в том случае, если в ней находился хотя бы один узел модельной сетки 75x75 км, в котором значение вероятности прогноза из поля W99R012D $P_2(X)$ (в процентах) было равно или превышало пороговое значение: соответственно

$P_{\text{пор.}} = 60\%$ для прогноза $V \geq 20$ м/с либо $P_{\text{пор.}} = 65\%$ для прогноза $V \geq 25$ м/с. В противном случае давался прогноз отсутствия явлений. В случае устойчивой стратификации сразу прогнозировалось отсутствие этих явлений.

Прогноз таких явлений считался оправдавшимся (в соответствии с Наставлением [11], с учетом допусков), если в области фактически наблюдался сильный шквал или максимальные порывы ветра со скоростью 18 и 22 м/с и более соответственно.

В лаборатории испытаний Гидрометцентра России А.Н. Багровым была разработана программа автоматизированной оценки альтернативного метода прогноза сильного ($V \geq 18$ м/с) и опасного ($V \geq 22$ м/с) ветра. Испытания проводились в течение летних сезонов 2010-2011 гг. Напомним, что летом 2010 года почти в течение полутора месяцев в Центрально-Черноземных областях, в Московской области и в Поволжье наблюдалась засуха в связи с аномально высокими дневными и ночными температурами у поверхности земли при наличии блокирующего антициклона.

Показатели успешности прогнозов рассчитываются с помощью таблицы сопряженности:

Прогноз	Фактическое количество случаев		Сумма
	с явлением	без явления	
с явлением	k_{11}	k_{12}	k_{10}
без явления	k_{21}	k_{22}	k_{20}
Сумма	k_{01}	k_{02}	k_{00}

где k_{11} – явление прогнозировалось и наблюдалось;

k_{22} – явление не прогнозировалось и не наблюдалось;

k_{12} – явление прогнозировалось, но не наблюдалось («ложные тревоги»);

$k_{10} = k_{11} + k_{12}$ – общее число случаев, когда прогнозировалось явление;

k_{21} – явление не прогнозировалось, но наблюдалось («пропуск цели»);

$k_{20} = k_{21} + k_{22}$ – общее число случаев с прогнозом отсутствия явления;

$k_{01} = k_{11} + k_{21}$ – общее число случаев с наличием явления;

$k_{02} = k_{12} + k_{22}$ – общее число случаев с отсутствием явления;

$k_{00} = k_{01} + k_{02}$ или $k_{10} + k_{20}$ – общее число случаев.

Показатели успешности прогнозов рассчитываются по формулам:

– оправдываемость явления $U_r, \%$

$$U_r = \frac{k_{11}}{k_{10}} \cdot 100; \quad (1)$$

– предупрежденность явления P_r , %

$$P_r = \frac{k_{11}}{k_{01}} \cdot 100; \quad (2)$$

– предупрежденность случаев без явления P_{or} , %

$$P_{or} = \frac{k_{22}}{k_{02}} \cdot 100; \quad (3)$$

– «ложные тревоги» с явлением LT_r , %

$$LT_r = \frac{k_{12}}{k_{10}} \cdot 100; \quad (4)$$

– «пропуск цели» PC_r , %

$$PC_r = \frac{k_{21}}{k_{01}} \cdot 100; \quad (5)$$

– критерий Пирси-Обухова T :

$$T = \frac{k_{11}}{k_{01}} - \frac{k_{12}}{k_{02}}. \quad (6)$$

Результаты оперативных испытаний гидродинамико-статистического прогноза сильных летних шквалов и порывов ветра скоростью $V \geq 18$ м/с (пороговая вероятность $P_{пор} = 60$ %) и $V \geq 22$ м/с (пороговая вероятность $P_{пор} = 65$ %) на текущий день (с заблаговременностью 12 ч от 00 ч ВСВ) для 17 областей Центрального федерального округа представлены в табл. 1.

Полученные по двум годам оценки предупрежденности явлений очень сильного ветра ($P_r = 72$ %) и его отсутствия ($P_{or} = 77$ %) свидетельствуют о том, что по областям ЦФО методом предупреждается большая часть явлений очень сильного ветра (≥ 22 м/с). Это касается и предупрежденности значительной доли его отсутствия. В связи с этим и критерий Пирси-Обухова составляет $T = 0,49$, что является вполне удовлетворительной оценкой для прогноза явлений, повторяемость которых составляет менее одного процента.

Кроме того, аналогичная автоматизированная оценка прогнозов проводилась по узлам сетки 75x75 км [10], покрывающей территорию ЦФО по небольшим областям радиусом 38 км от узлов модельной сетки прогноза. Результаты оценки представлены в табл. 2.

Показатели качества прогнозов ветра $V \geq 22$ м/с за два года по этим небольшим областям, входящим в ЦФО, несколько ниже, но критерий Пирси составил $T = 0,42$ при повторяемости явлений, составляющей уже 0,2 %.

На рис. 1 представлен пример прогноза сильного ветра в ЦФО на 13.06.2010 г. Фактически в Московской области наблюдался ветер 24 м/с, в Ивановской области – 30 м/с, в Рязанской области – 33 м/с. Вероятности прогноза по этим территориям ($P_{\text{пор}} = 80\text{--}95\%$) существенно выше пороговой вероятности $P_{\text{пор}} = 65\%$.

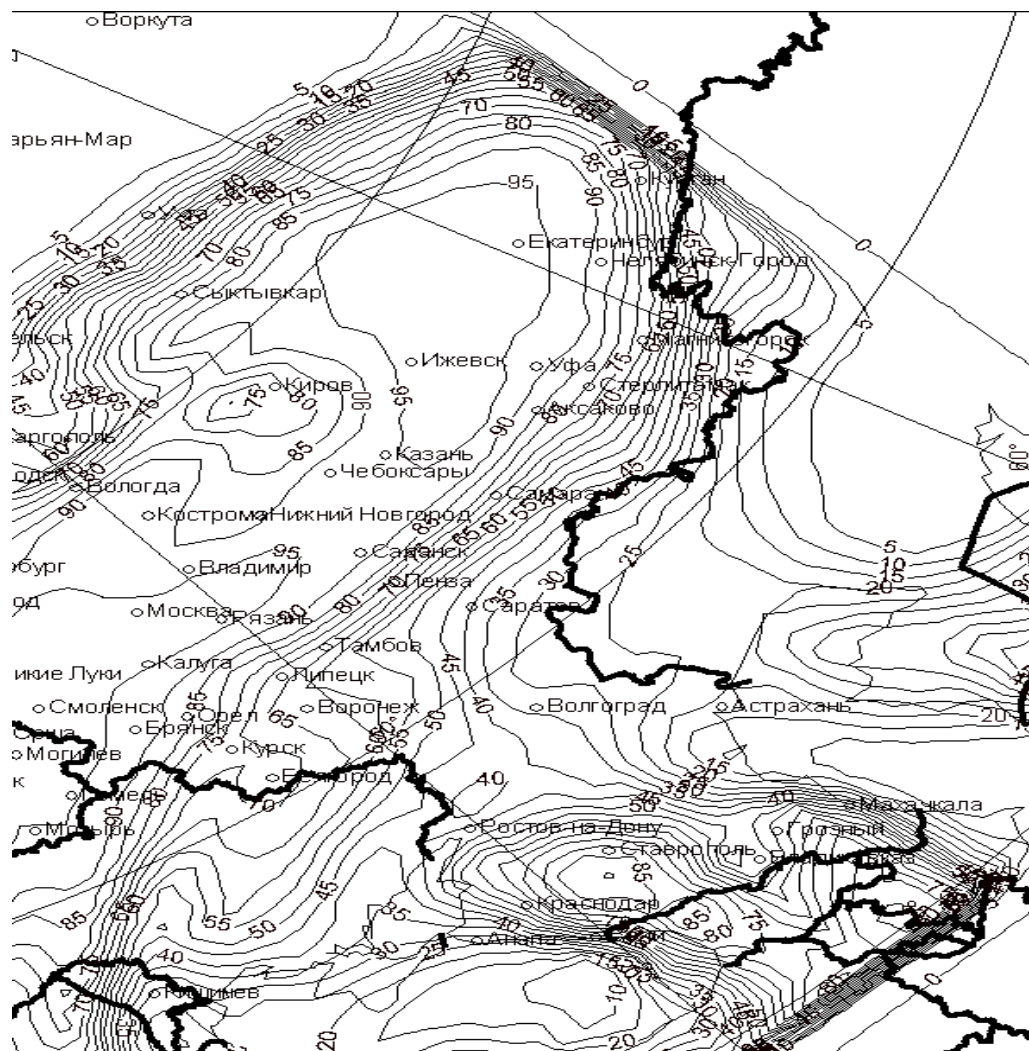


Рис. 1. Прогноз скорости ветра на 13.06.2010 г. с заблаговременностью 12 ч. Область прогноза ветра скоростью 24 м/с выделяется изолинией пороговой вероятности $P=65\%$.

Результаты испытаний метода прогноза шквалов и очень сильного ветра скоростью 22 м/с и более по ЕТР

В лаборатории испытаний ФГБУ «Гидрометцентр России» также была проведена автоматизированная оценка альтернативного прогноза порывов ветра скоростью $V \geq 22$ м/с для ЕТР на текущий день с заблаговременностью 18 ч от срока 00 ч ВСВ..

Оценка проводилась для узлов модельной сетки 75х75 км, покрывающих ЕТР, аналогичным способом, что и для территории ЦФО. Прогноз явления давался при условии, что значение вероятности в узле $P_{\text{пор}} \geq 65\%$.. При этом прогноз считался оправдавшимся, если в радиусе 38 км от узла сетки наблюдался ветер скоростью $V \geq 22$ м/с.

Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Оценки прогноза ветра $V \geq 22$ м/с по сроку 00 ч ВСВ на текущий день по узлам
модельной сетки 75х75 км территории ЕТР**

Период испытаний	Исходная матрица прогнозов			P_r	P_{or}	PC_r	LT_r	U_r	Т
	k11	k12	k10						
	k21	k22	k20						
	k01	k02	k00						
15.05–16.09 2010 г.	53	4648	4701	71,6	81,4	28,4	98,9	1,1	0,53
	21	20368	20389						
	74	25016	25090						
15.05–16.09 2011 г.	9	2857	2866	25,7	86,6	74,3	99,7	0,3	0,14
	26	22251	22277						
	35	25108	25143						
Летние сезоны 2010–2011 гг.	62	7505	7567	56,9	85,0	43,1	99,2	0,8	0,42
	47	42619	42666						
	109	50124	50233						

Как видно из таблицы, за период 2010–2011 гг. 56,9 % явлений и 85 % их отсутствия предусмотрены прогнозом. Но процент «ложных тревог» при этом очень велик (99,2 %), на что необходимо обратить внимание синоптиков при использовании представленной методики. На рис. 2 приводится пример расчета прогноза сильных шквалов и ветра на 29.07.2010 г.

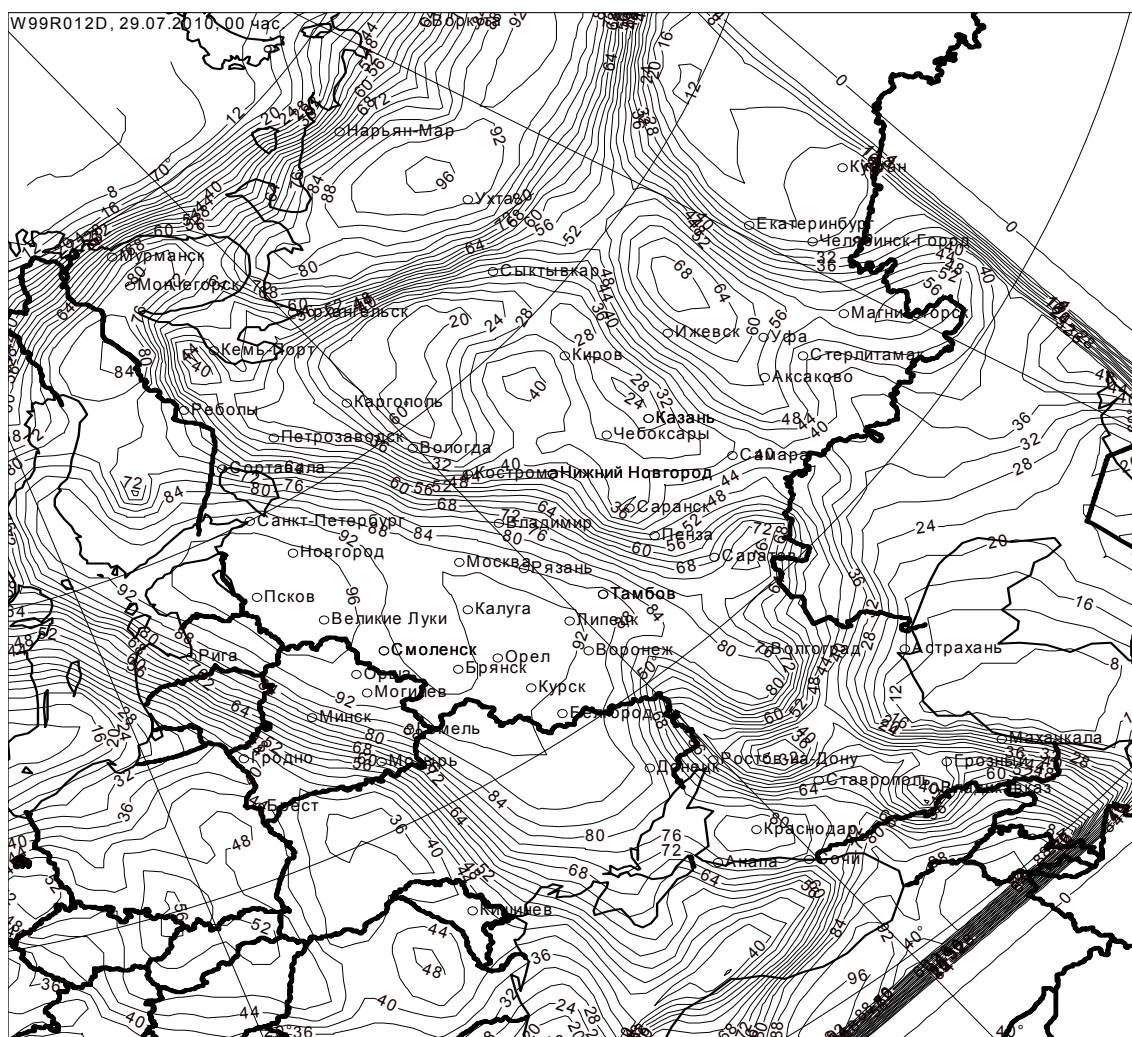


Рис. 2. Прогноз ветра скоростью $V > 24$ м/с на текущий день 29.07.2010 г.

В этот день в Московской области был отмечен ветер со скоростью $V = 33$ м/с, в Санкт-Петербурге – с $V = 29$ м/с, в других областях были отмечены сильные ветры со скоростью около 20-22 м/с. Во всех этих областях вероятность прогноза значительно превышала пороговую вероятность.

Заключение

Решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам от 6 февраля 2012 г. утверждено Решение секции Ученого совета ФГБУ «Гидрометцентр России» от 24 января 2012 г.:

1. Одобрить работу ФГБУ «Гидрометцентр России» по совершенствованию методов прогноза опасных явлений погоды и проведению испытаний метода.

2. Рекомендовать ФГБУ «Гидрометцентр России» и АНО «Московское ГМБ» использовать гидродинамико-статистический метод прогноза шквалов и очень сильного ветра в градации ≥ 20 м/с на основе выходных данных региональной модели с заблаговременностью 12 ч в летний период для центральной части Европейской территории России в качестве консультативного, обратив внимание на относительно большое число ложных тревог.
3. Рекомендовать автору метода провести работу по улучшению визуализации результатов прогноза.

Список литературы

1. Беркович Л.В., Ткачева Ю.В. Развитие неадиабатической полушарной прогностической модели атмосферы // Труды Гидрометцентра СССР. – 1985. – Вып. 277. – С. 3–29.
2. Булдовский Г.С., Шаколько Е.Н. О результатах испытания автоматизированного метода прогноза дневной максимальной скорости ветра, связанной с активной конвекцией, для территории Московской области и прилегающих областей с заблаговременностью 12 и 24 ч // Информационный сборник № 25. – 1999. – С. 34–37.
3. Веселова Г.К., Гайфутдинова Р.Г., Гостева И.П., Дурова Т.В. Результаты испытания автоматизированного метода прогноза дневных максимальных скоростей ветра (не менее 20 м/с), связанных с активной конвекцией, заблаговременностью 12 и 24 ч // Информационный сборник № 23. – 1995. – С. 7–12.
4. Лосев В.М. Региональная гидродинамическая модель прогноза Гидрометцентра России // 80 лет Гидрометцентру России. – М.: Триада, лтд, 2010. – С. 36–58.
5. Переходцева Э.В., Золин Л.В. Экспертная система и гидродинамико-статистический прогноз смерчей на территории России // Труды Гидрометцентра СССР. – 2008. – Вып. 342. – С. 37–50.
6. Переходцева Э.В. Анализ устойчивости гидродинамико-статистической модели прогноза шквалов и смерчей для территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. – 2009. – Т. 1. Вып. 6. – С. 155–162.
7. Переходцева Э.В. Прогноз сильных шквалов и смерчей в летний период 2009 года на основе статистических моделей // Труды Гидрометцентра России. – 2010. – Вып. 344. – С. 265–279.
8. Переходцева Э.В. О гидродинамико-статистическом прогнозе до двух суток явлений сильного ветра и сильных осадков для территории Северного Кавказа // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 347. – С. 113–125.
9. Perekhoditseva E.V. Hydrodynamic-statistical model of forecast to 36h ahead of dangerous convective phenomena –squalls, tornadoes and rainfalls // Res. Act. Atm. Ocean. Model. – 2002. – Rep. 32, part 2. – P. 221–223.

10. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. – М.: 1991. – 149 с.

11. РД 52.27.724-2009. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. – Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2009. – 50 с.

Таблица 1

Результаты автоматизированной оценки гидродинамико-статистического прогноза сильных летних шквалов и порывов ветра скоростью $V \geq 18$ м/с (пороговая вероятность $P_{\text{пор}} = 60\%$) и $V \geq 22$ м/с (пороговая вероятность $P_{\text{пор}} = 65\%$) на текущий день (с заблаговременностью 12 ч от 00 ч ВСВ) для 17 областей Центрального федерального округа

Период испытаний	Скорость ветра,	Исходная матрица прогнозов			U_r	P_r	P_{or}	PC_r	LT_r	Т
		k11	k12	k10						
		k21	k22	k20						
		k01	k02	k00						
15.05–16.09 2010 г.	≥ 18 м/с	62 25 87	489 1243 1732	551 1268 1819	11,3	71,3	71,8	28,7	88,7	0,43
15.05–16.09 2011 г.	≥ 18 м/с	12 28 40	328 1672 2000	340 1700 2040	3,5	30,0	83,6	70,0	96,5	0,14
Летние сезоны 2010–2011 гг.	≥ 18 м/с	74 53 127	817 2915 3732	891 2968 3859	8,3	58,3	78,1	41,7	91,7	0,36
15.05–16.09 2010 г.	≥ 22 м/с	22 3 25	529 1265 1794	551 1268 1819	4,0	88,0	70,5	12,0	96,0	0,58
15.05–16.09 2011 г.	≥ 22 м/с	1 6 7	339 1694 2033	340 1700 2040	0,3	14,3	83,3	85,7	99,7	–0,02
Летние сезоны 2010–2011 гг.	≥ 22 м/с	23 9 32	868 2959 3827	891 2968 3859	2,6	71,9	77,3	28,1	97,4	0,49

Таблица 2

Результаты автоматизированной оценки гидродинамико-статистического прогноза сильных летних шквалов и порывов ветра скоростью $V \geq 18$ м/с (пороговая вероятность $P_{\text{пор}} = 60\%$) и $V \geq 22$ м/с (пороговая вероятность $P_{\text{пор}} = 65\%$) на текущий день (с заблаговременностью 12 ч от 00 ч ВСВ) по узлам сетки прогноза (17х18)

Период испытаний	Скорость ветра,	Исходная матрица прогнозов			U_r	P_r	P_{or}	PC_r	LT_r	Т
		k11	k12	k10						
		k21	k22	k20						
		k01	k02	k00						
15.05–16.09 2010 г.	≥ 18 м/с	218 101 319	5606 19165 24771	5824 19266 25090	3,7	68,3	77,4	31,7	96,3	0,45
15.05–16.09 2011 г.	≥ 18 м/с	65 112 177	3641 21325 24966	3706 21437 25143	1,8	36,7	85,4	63,3	98,2	0,22
Летние сезоны 2010–2011 гг.	≥ 18 м/с	283 213 496	9247 40490 49737	9530 40703 50233	3,0	57,1	81,4	42,9	97,0	0,38
15.05–16.09 2010 г.	≥ 22 м/с	53 21 74	4648 20368 25016	4701 20389 25090	1,0	71,6	81,4	28,4	99,0	0,53
15.05–16.09 2011 г.	≥ 22 м/с	9 26 35	2857 22251 25108	2866 22277 25143	0,3	25,7	88,6	74,3	99,7	0,15
Летние сезоны 2010–2011 гг.	≥ 22 м/с	62 47 109	7505 42619 50124	7567 42666 50233	0,8	56,9	85,0	43,1	99,2	0,42

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Н.П. Шакин., Е.И. Ветров, Е.Н. Скриптунов, А.Р. Иванова, А.Н. Багров.</i> Метод краткосрочного прогноза наличия низкой облачности для авиации	3
<i>З.К. Абузьяров.</i> Физико-статистический метод фонового прогноза уровня Каспийского моря на срок 6 лет	23
<i>И.О. Думанская.</i> Метод долгосрочного прогноза ледовых условий на Белом и Азовском морях, основанный на использовании статистического моделирования.....	41
<i>Б.С. Струков, А.А. Зеленко, Ю.Д. Реснянский, С.Л. Мартынов.</i> Система прогнозирования характеристик ветрового волнения и результаты ее испытаний для акваторий Азовского, Черного и Каспийского морей.....	64
<i>Г.И. Анжисина, А.Н. Вражский, Т.П. Щербинина, Е.В. Примачёв.</i> Автоматизированный метод прогноза средней месячной ледовитости Охотского, Японского и Берингова морей с заблаговременностью до одного года	80
<i>В.П. Карклин, И.Д. Карелин, А.В. Юлин.</i> Метод прогноза сроков окончательного разрушения припая в районах восточной части моря Лаптевых заблаговременностью до одного месяца	97
<i>В.С. Косых, Л.Б. Чубаров, В.К. Гусяков, Д.А. Камаев, В.М. Григорьева, С.А. Бейзель.</i> Методика расчета максимальных высот волн цунами в защищаемых пунктах побережья Дальнего Востока Российской Федерации.....	115
<i>Т.В. Старостина, И.Г. Ковригина.</i> Результаты испытания методов прогноза урожайности и валового сбора ярового ячменя и овса по Новосибирской и Кемеровской областям, Алтайскому краю и урожайности яровой пшеницы по отдельным административным районам Новосибирской области.....	135
<i>В.М. Лебедева.</i> Результаты испытаний метода долгосрочного прогноза теплообеспеченности вегетационного периода по территории Свердловской области.....	151
<i>В.П. Карклин, А.В. Юлин.</i> Метод прогноза сроков окончательного разрушения припая заблаговременностью 15-30 суток в районах юго-западной части Чукотского моря.....	158
<i>Э.В. Переходцева.</i> Гидродинамико-статистический метод прогноза шквалов и очень сильного ветра в градации опасных явлений в летний период с заблаговременностью 12–36 ч по выходным данным региональной модели для Европейской территории России	170

Метод краткосрочного прогноза наличия низкой облачности для авиации / Шакина Н.П., Ветрова Е.И., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р., Багров А.Н. // Информационный сборник № 40. – 2013. – С. 3–22.

Кратко изложена сущность метода прогноза наличия низкой (с нижней границей не выше 1500 м) облачности в количестве не менее 6 окт с заблаговременностью 12 и 24 ч по 30 аэродромам и по Европейской территории России, стран СНГ и Балтии. Прогноз рассчитывается по выходным данным численных моделей ПЛАВ и COSMO-RU07. Эффективность представленного метода прогноза наличия низкой облачности по конкретным аэродромам оценена путем сравнения прогнозируемого наличия или отсутствия явления в ближайшем к аэродрому узле модельной сетки с наблюдениями на аэродроме в срок прогноза в течение периода оперативных испытаний (май 2011–апрель 2012 г. для модели ПЛАВ и июль 2011–апрель 2012 г. для модели COSMO-RU07); эффективность прогноза по территории оценена путем сравнения прогнозируемого наличия либо отсутствия явления с аналогичным расчетом по начальным полям модели в срок прогноза. Показатели успешности, согласно оперативным испытаниям (критерии Пирси-Обухова и Хайдке-Багрова), высокие в обоих вариантах метода (по конкретным аэродромам и по территории).

Решением ЦМКП Росгидромета от 13 июня 2012 г. метод рекомендован к использованию в качестве основного расчетного метода при прогнозировании условий полета на нижних уровнях для авиации. ЦМКП постановила считать целесообразной организацию выпуска в ФГБУ «Гидрометцентр России» карт особых явлений на нижних уровнях для использования при метеообеспечении авиации.

Табл. 11. Ил. 1 Библ. 5.

Физико-статистический метод фонового прогноза уровня Каспийского моря на срок 6 лет / Абузьяров З.К. // Информационный сборник № 40. – 2013. – С. 23–40.

Описан физико-статистический метод прогностических оценок фоновых изменений уровня Каспийского моря (УКМ) на срок до 6 лет. Метод основан на выявленных закономерностях и связях между межгодовой изменчивостью УКМ и изменчивостью количественных показателей атмосферной циркуляции. Построение асинхронных прогностических зависимостей на этой основе показало возможность прогноза УКМ на срок до 6 лет. По результатам проверочных прогнозов, составленных с 1996 по 2009 г., средняя оправдываемость методических прогнозов составила 85 %, эффективность методических прогнозов оказалась на 15 % выше климатических и на 8 % выше успешности прогнозов, составленных ранее по методике Белинского-Калинина-Смирновой (в период с 1950 по 1975 г.), но при допустимой ошибке 40 см.

ЦМКП Росгидромета от 1.03.2011 г. приняла решение рекомендовать метод фонового прогноза изменений уровня Каспийского моря на срок до 6 лет к практическому использованию в ФГБУ «Гидрометцентр России» как успешно прошедшего проверку. Прогноз изменений УКМ на ближайшее 6-летие (или его уточнение) помещать вместе с прогнозом УКМ на один год в гидрометеорологический бюллетень, выпускаемый ФГБУ «Гидрометцентр России» ежегодно в начале мая.

Табл. 3. Ил. 11. Библ. 11.

Метод долгосрочного прогноза ледовых условий на Белом и Азовском морях, основанный на использовании статистического моделирования / Думанская И.О. // Информационный сборник № 40. – 2013. – С. 41–63.

Исследованы статистические связи параметров поля приземной температуры воздуха и поля давления с характеристиками ледовых процессов на Белом и Азовском морях. Определены параметры гармонических составляющих для расчета межгодовой изменчивости ледовых характеристик этих морей. Представлено описание ансамблевого метода прогноза ледовых условий, состоящего из трех компонентов, а также результаты расчетов с его помощью. Определена эффективность работы каждого компонента и метода в целом. Ансамблевый метод ледового прогноза для портов неарктических морей дал хороший результат (эффективность 15–25 % по сравнению с климатическим прогнозом), это позволяет использовать его в оперативной практике Гидрометцентра России.

Табл. 15. Ил. 3. Библ. 10.

Система прогнозирования характеристик ветрового волнения и результаты ее испытаний для акваторий Азовского, Черного и Каспийского морей / Струков Б.С., Зеленко А.А., Реснянский Ю.Д., Мартынов С.Л. // Информационный сборник № 40. – 2013. – С. 64–79.

В статье представлены сведения о методических и технологических особенностях системы прогнозирования основных параметров ветрового волнения в южных морях России. Рассмотрены результаты испытаний прогностической системы, основанные на сопоставлении модельных расчетов с данными спутниковых измерений высоты ветровых волн. Оценки оправдываемости прогнозов по результатам этих испытаний свидетельствуют о значительной информативности прогностических расчетов, на основании чего решением ЦМКП Росгидромета система была рекомендована для оперативного использования.

Табл. 5. Ил. 2. Библ. 18.

Автоматизированный метод прогноза средней месячной ледовитости Охотского, Японского и Берингова морей с заблаговременностью до одного года / Анжина Г.И., Вражкин А.Н., Щербинина Т.П., Примачёв Е.В. // Информационный сборник № 40. – 2013. – С. 80–96.

Приводится описание метода и технологии долгосрочного прогноза средней месячной ледовитости Охотского, Японского и Берингова морей. Результаты оперативных испытаний метода, проведенных в ледовые сезоны 2008/2009–2010/2011 гг., показали преимущества методических прогнозов в сравнении с климатологическими.

Решение ЦМКП Росгидромета от 6 февраля 2012 г.:

- внедрить метод прогноза средней месячной ледовитости Охотского, Японского и Берингова морей в оперативную практику ФГБУ «ДВНИГМИ»;
- рекомендовать прогностическим подразделениям Росгидромета, занимающимся обеспечением потребителей ледовой информацией, использовать выходную продукцию внедренного метода в практической работе.

Табл. 6. Ил. 2. Библ. 10.

Метод прогноза сроков окончательного разрушения припая в районах восточной части моря Лаптевых заблаговременностью до одного месяца / Карклин В.П., Карелин И.Д., Юлин А.В. // Информационный сборник № 40. – 2013. – С. 97–114.

Дана краткая характеристика припая моря Лаптевых в период его формирования и разрушения по данным ИСЗ за период 1980–2006 гг. Разработаны два метода окончательного разрушения припая на подходах к проливам Дм. Лаптевых (район 1) и Санникова (район 2). Методы разработаны на физико-статистической основе. В одном из методов в качестве предикторов прогностического регрессионного уравнения используются температура воздуха на репрезентативных полярных станциях, площади припая и полыней в восточной части моря Лаптевых. Методическая обеспеченность уравнений равна 86 % (при оценке $0,8\sigma$), эффективность – 21 %. Оправдываемость прогнозов за период 2007–2011 гг. составила для района 2 100 % (эффективность 60 %), для района 1 80 % (эффективность 40 %).

Для разработки второго метода использована автоматическая информационная программа «Пегас», которая производит отбор информационных предикторов (по заданному порогу значимости коэффициентов корреляции) в поле среднемесячных полей атмосферного давления, а также среди рядов наблюдений гидрометеорологических и ледовых показателей и находит обобщенные показатели для прогностических уравнений. Методическая обеспеченность этих уравнений составила 84 % для района 1 и 91 % для района 2 (эффективность 18 % и 22 % соответственно). Оправдываемость прогнозов за период составила для района 2 60 % (эффективность 20 %), для района 1 – 80 % (эффективность 20 %).

Методы рекомендованы ЦМКП Росгидромета для использования в оперативной практике.

Методика расчета максимальных высот волн цунами в защищаемых пунктах побережья Дальнего Востока Российской Федерации / Косых В.С., Чубаров Л.Б., Гусяков В.К., Камаев Д.А., Григорьева В.М., Бейзель С.А. // Информационный сборник № 40. – 2013. – С. 115–134.

Рассмотрена методика расчета максимальных высот волн цунами в защищаемых пунктах побережья Дальнего Востока Российской Федерации в рамках моделей упругой среды и длинноволнового приближения теории мелкой воды.

Методика предназначена для специалистов Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) и других ведомств, участвующих в разработке системы предупреждения о цунами на Дальнем Востоке РФ.

Ил. 7. Библ. 8.

Результаты испытания методов прогноза урожайности и валового сбора ярового ячменя и овса по Новосибирской и Кемеровской областям, Алтайскому краю и урожайности яровой пшеницы по отдельным административным районам Новосибирской области / Старостина Т.В., Ковригина И.Г. // Информационный сборник № 40. – 2013. – С. 135–150.

Приведены результаты испытания методов прогноза урожайности ярового ячменя и овса по Новосибирской и Кемеровской областям, Алтайскому краю и урожайности яровой пшеницы по отдельным административным районам Новосибирской области, разработанных в рамках выполнения региональной темы Плана НИОКР Росгидромета на 2008–2009 гг. Технический совет ФГБУ «Новосибирский ЦГМС-РСМЦ» на заседании от 10 апреля 2012 года рекомендовал к внедрению в оперативную практику Гидрометцентра ФГБУ «Новосибирский ЦГМС-РСМЦ», Кемеровского и Алтайского ЦГМС с 2012 года методы прогноза урожайности ярового ячменя, овса и яровой пшеницы по территории Новосибирской, Кемеровской областей и Алтайского края в качестве основных.

Табл. 8. Библ. 6.

Результаты испытаний метода долгосрочного прогноза теплообеспеченности вегетационного периода по территории Свердловской области / Лебедева В.М. // Информационный сборник № 40. – 2013. – С. 151–157.

Рассмотрены результаты производственных испытаний метода долгосрочного прогноза теплообеспеченности вегетационного периода по территории Свердловской области. В основу метода положены физико-статистические зависимости параметров циркуляции атмосферы всего Северного полушария в предшествующий вегетации период с его теплообеспеченностью в том или ином регионе. При этом важную роль играет гидросфера Земли, которая, взаимодействуя с атмосферой, аккумулирует и перераспределяет энергию между отдельными районами земного шара.

В качестве предиктантов в предлагаемом методе используются первые два коэффициента разложения по естественным ортогональным составляющим поля сумм температур выше 10 °С по 11 метеорологическим станциям Свердловской области, а предикторами являются средние месячные значения геопотенциала на уровне 500 гПа и температуры поверхности воды Атлантического океана. Преимуществом прогноза является большая заблаговременность, прогноз составляется в марте.

Для составления прогнозов ожидаемой теплообеспеченности вегетационного периода в 11 пунктах Свердловской области разработан пользовательский интерфейс, позволяющий в значительной мере упростить работу агрометеоролога-прогнозиста. Производственные испытания указанного метода проходили в 2009–2011 гг. в ФГБУ «Свердловский ЦГМС-Р».

Табл. 3. Ил. 1. Библ. 5.

Метод прогноза сроков окончательного разрушения припая заблаговременностью 15-30 суток в районах юго-западной части Чукотского моря / Карклин В.П., Юлин А.В. // Информационный сборник № 40. – 2013. – С. 158–169.

Метод основан на физико-статистической основе с использованием автоматической информационной программы с условным названием «Пегас». Метод базируется на данных ИСЗ, ледовых обзорных и региональных картах ААНИИ и наблюдениях на полярных станций. Припайная зона чукотского побережья разделена на три района, отличающихся некоторыми режимными особенностями в период формирования и разрушения припая. Метод разрушения припая разработан для каждого района.

Методическая обеспеченность прогностических уравнения на зависимых рядах сроков разрушения припая (для критериев $0,8\sigma$ и $0,674\sigma$) составила 86–93 %, эффективность в сравнении с природной обеспеченностью – 29–36 %.

Оправдываемость прогнозов сроков окончательного разрушения припая за испытательный период 2008–2012 гг. (по критерию $0,8\sigma$) составляет для всех районов 80 %, эффективность в зависимости от района изменяется в пределах 12–22 %.

Табл. 8. Ил. 5. Библ. 2.

Гидродинамико-статистический метод прогноза шквалов и очень сильного ветра в градации опасных явлений в летний период с заблаговременностью 12–36 ч по выходным данным региональной модели для Европейской территории России / Переходцева Э.В. // Информационный сборник № 40. – 2013. – С. 170–181.

В течение 2010–2011 гг. в лаборатории испытаний ФГБУ «Гидрометцентр России» в рамках оперативных испытаний проводилась автоматизированная оценка результатов прогноза усовершенствованного гидродинамико-статистического метода прогноза сильных шквалов и максимальных порывов ветра скоростью $V \geq 20$ м/с и $V \geq 25$ м/с, использующего выходные данные региональной гидродинамической модели (автор – В.М. Лосев). Приводятся результаты автоматизированной оценки альтернативного метода прогноза скорости ветра $V \geq 18$ м/с и $V \geq 22$ м/с по 17 областям территории ЦФО и по узлам модельной сетки 75х75 км, покрывающей территорию ЕТР.

ЦМКП Росгидромета рекомендовала использование метода прогноза скорости ветра $V \geq 20$ м/с на основе выходных данных региональной модели с заблаговременностью 12 ч в Гидрометцентре России и АНО «Московское ГМБ» в летний период для центральной части ЕТР в качестве консультативного. Все рассчитываемые прогнозы сильного ветра с заблаговременностью 12–48 ч выкладываются на FTP-сервер Гидрометцентра России ежедневно два раза в сутки.

Табл. 3. Ил. 2. Библ. 11.