

УДК [551.46:551.509.33]:639.22.053.1(261.1+268.45)

## ОБ ОЦЕНКЕ ОПРАВДЫВАЕМОСТИ ДОЛГОСРОЧНЫХ ПРОГНОЗОВ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В СЕВЕРНОМ ПРОМЫСЛОВОМ БАССЕЙНЕ

*И.П. Карпова, Д.В. Густоев, А.С. Аверкиев*

Российский государственный гидрометеорологический университет, guto@rshu.ru

Приводятся результаты анализа качества исходных океанологических данных в Северной Атлантике и Баренцевом море, используемых для составления долгосрочных и сверхдолгосрочных прогнозов гидрометеорологических характеристик. Показано, что используемые для оценки оправдываемости прогнозов величины средних квадратических отклонений от нормы соизмеримы с точностью исходных данных и не могут служить достаточным критерием для оценки как успешности прогнозов, так и качества методики прогнозирования.

**Ключевые слова:** прогноз, оправдываемость, эффективность, температура воды, ледовитость, статистические методы.

## ON THE ASSESSMENT OF ACCURACY OF LONG-TERM FORECASTS OF HYDROMETEOROLOGICAL ELEMENTS IN THE NORTHERN FISHERIES BASIN

*I.P. Karpova, D.V. Gustoev, A.S. Averkiev*

Russian State Hydrometeorological University

The results of the analysis of the quality of the source oceanographic data in the North Atlantic and the Barents sea used to compile long-term and super-long-term forecasts of hydrometeorological characteristics are presented. It is shown that values of average squared deviations from the norms used to estimate the probability of the forecasts commensurate with the accuracy of the source data and can not serve both as a sufficient criterion for assessing the accuracy of forecasts and as the quality of the prediction technique.

**Keywords:** forecast, accuracy of forecast, efficiency, water temperature, ice cover, statistical methods.

### Введение

На протяжении более полувека в ЛГМИ — РГГМИ — РГГМУ по договору с ПИНРО составляются оперативные прогнозы среднегодовой температуры воды в слое 0—200 м для разреза «Кольский меридиан» и квартальной температуры поверхности океана (ТПО) для отдельных промысловых районов Северной Атлантики. В последний период для ряда районов рыбного промысла добавились

опытные гидрометеорологические прогнозы (помимо прогноза ТПО, составлялись прогнозы температуры воздуха, ледовитости и индекса Северо-Атлантического колебания, NAO) в диапазоне заблаговременности от одного квартала до четырех лет [3]. Составление долгосрочных прогнозов выполнялось путем использования статистико-вероятностных методов: климатического, инерционного, динамико-статистического, динамико-стохастического, авторегрессионного 1—3-го порядка.

Пользователи гидрометеорологической информации, оценивая эффективность методик долгосрочного прогнозирования гидрометеорологических характеристик, обычно имеют в виду экономический эффект. Однако для количественной оценки экономического эффекта прогнозов гидрометеорологических характеристик у разработчика прогнозов обычно нет необходимой информации по их использованию в практической деятельности рыбопромышленных организаций (при принятии плановых, организационных, экономических решений). В соответствии с разделом руководящего документа «Наставление по службе прогнозов» понятие «эффективность прогнозов» — это «комплексная характеристика успешности прогноза, учитывающая его заблаговременность и оправдываемость» [4]. Величина предельной заблаговременности прогнозов гидрометеорологических характеристик является одним из важнейших критериев выбора прогностической модели. В нашем случае заблаговременность прогнозов гидрометеорологических характеристик для районов Северного промышленного бассейна определялась потребностями заказчика и была четко оговорена в договорах между РГГМУ и ПИНРО. Используя многолетний опыт в области составления долгосрочных и сверхдолгосрочных прогнозов гидрометеорологических характеристик, и в частности температуры воды в слое 0—200 метров на разрезе Кольский меридиан, считаем необходимым высказать некоторые соображения, касающиеся как заблаговременности, так и оценки оправдываемости прогнозов.

Цель данной статьи — привлечь внимание прогнозистов и непосредственных пользователей гидрометеорологических прогнозов в рыбной отрасли к принятой в настоящее время методике оценки успешности прогнозирования [4]. Для этого осуществлено сравнение оценок оправдываемости прогнозов гидрометеорологических характеристик за периоды 1986—2016 и 2015—2016 гг. и выполнено сопоставление полученных результатов с качеством исходной информации.

Успешность океанографического прогноза статистико-вероятностными методами определяется как особенностями используемого метода, позволяющего учесть основные закономерности тенденций изменения рассматриваемых характеристик, так и качеством исходных данных соответствующей точности. Используемый нами для составления долгосрочных и сверхдолгосрочных прогнозов метод сверхдолгосрочного прогнозирования гидрометеорологических элементов [1], основанный на учете циклических изменений, постоянно происходящих в природе, позволяет выявлять и учитывать основные закономерности этих изменений. Однако для использования этой методики необходимы продолжительные ряды наблюдений, включающие основные значимые квазипериодические колебания исследуемого процесса. Отсутствие продолжительных временных рядов результатов непосредственных натурных наблюдений приводит к необходимости

использования в качестве исходных данных результатов моделирования (базы данных реанализа *Extended Reconstructed Sea Surface Temperature*). Так, в частности, для прогноза квартальных значений ТПО приходится использовать не непосредственно измеренные числовые значения температуры поверхности воды, а реконструкцию, представленную в Интернете [5]. Эти значения ТПО конструируются на основе совместной обработки данных судовых, буйковых и спутниковых наблюдений и представлены в виде осредненных данных соответственно в центрах одно- или двухградусных квадратов. Используемые ряды данных наблюдений среднемесячной температуры воды на вековом разрезе «Кольский меридиан» в слое 0—200 м и ледовитости Баренцева моря также подвергаются соответствующей математической обработке, в частности, для приведения значений к середине соответствующего месяца, хотя, к сожалению, наблюдения на разрезе выполняются не ежемесячно, особенно в последние годы [7].

### Результаты оценки оправдываемости прогнозов

На протяжении тридцати лет для составления квартальных прогнозов температуры поверхности воды авторами использовались карты среднемесячной ТПО, оперативно составляемые в Гидрометцентре РФ. Однако начиная с середины 90-х годов прошлого столетия получение таких карт стало невозможным, и пришлось перейти на данные реанализа, представленные в Интернете. Была проведена оценка согласованности полей среднемесячной ТПО для районов Северной Атлантики на материалах за 1982—1996 гг., представленных Гидрометцентром РФ и полученных по каналам Интернета в рамках IGOSS. Проверка рассогласованности этих полей привела к выводу об отсутствии систематических однонаправленных различий между ними, районы и периоды преобладания положительной или отрицательной аномалии температуры воды чередовались случайным образом. Разность среднемесячных значений ТПО в центрах одноименных квадратов превышала  $\pm 1$  °С. Трудно однозначно судить о причинах подобных различий. Вероятно, такие расхождения обусловлены рядом факторов и вызваны различиями в выборе и использовании исходной информации, а также в методах ее обработки, в частности способах интерполяции. Для измерения температуры воды используются зонды, глубоководные термометры (точность измерения 0,01 °С), поверхностные термометры (точность измерения 0,1 °С), спутниковые данные (точность измерения до 1,5 °С [6]). Совместное использование таких данных требует дополнительной обработки: проведения осреднения и интерполяции, применения математического моделирования как для оценки качества непосредственных инструментальных измерений, так и спутниковых данных.

Начиная с 2002 года исходными данными для квартальных прогнозов ТПО ряда районов Северо-Западной Атлантики служили материалы, полученные с сервера Международного центра климатических прогнозов (США, IGOSS — расширенная реконструкция температуры поверхности моря) в узлах 2-градусной сетки. Нами были опробованы три версии реконструкций ТПО: ERSST.v2., ERSSTv3 и ERSST.v3b [5]. Наиболее точной считается последняя версия, в которой не учитываются данные спутниковых измерений температуры воды. Таким образом, фактически по каналам Интернета мы получаем не измеренную с четко указанной

точностью температуру воды, а «модельную» температуру — реконструкцию, рассчитанную по ряду моделей (учитывающих район наблюдений, приведение значения ТПО к центру рассматриваемого квадрата, проведение интерполяции на 15-е число месяца) с использованием данных наблюдений разной точности. Точности представления такой модельной ТПО по версии v3b (и по другим подобным версиям) в литературе, указанной в ссылках, на соответствующих сайтах авторы не нашли.

Кроме того, важно отметить следующее: среднемесячные значения реконструкции ТПО (по версии v3b) в последние годы даются оперативно на протяжении первой декады последующего месяца в первоначальном варианте и уточненном через один-два месяца, причем расхождения между этими значениями для одного и того же центра квадрата могут достигать  $\pm 0,2$  °С. Объяснений, почему это происходит, авторы в Интернете не нашли. Вероятно, это связано с пересчетом ТПО по используемым моделям после получения новых данных. Отсутствие других инструментальных полученных продолжительных временных рядов температуры воды для фиксированных районов моря заставляет использовать эти модельные ряды в качестве исходных данных при составлении квартальных прогнозов ТПО.

Оперативные квартальные прогнозы ТПО с использованием данных реанализа составлялись с 2003 по 2016 г. для следующих районов: Норвежское море (район судна погоды «М»), Фарерская зона (северный и южный районы), район моря Ирмингера, от двух до четырех районов Северо-Восточной Атлантики (СВА). На протяжении указанного периода изменялись как положение некоторых

*Таблица 1*

Число прогнозов, составленных в рамках договоров с ПИНРО в 2015 и 2016 гг.,  
и оценки их оправдываемости (P)

Тип прогноза	2015 г.		2016 г.	
	Число	P %	Число	P %
Среднемесячные значения температуры воды на разрезе Кольский меридиан	108	90	94*	40
Квартальные и годовые значения ТПО по четырем районам Северо-Западной Атлантики	50	80	50	93
Квартальные и годовые значения температуры воздуха по четырем районам Северо-Западной Атлантики	30	72	30	83
Среднегодовая ледовитость по четырем районам Северо-Западной Атлантики	4	75	4	100
Квартальные прогнозы ТПО по четырем районам Северо-Восточной Атлантики и району Норвежского моря	8	63	8	100
Среднегодовые прогнозы температуры воды на разрезе Кольский меридиан и ледовитости Баренцева моря	2	100	2	Не оценивалась**
«Зимний» индекс NAO	2	100	2	50
Общее число	204		190	

\* Меньшее число прогнозов в 2016 г. по сравнению с 2015 г. обусловлено отсутствием наблюдений в июне — декабре 2016 г. на разрезе Кольский меридиан.

\*\* Температура воды на разрезе Кольский меридиан не оценивалась ввиду отсутствия наблюдений во вторую половину 2016 г.; прогноз ледовитости не оправдался на 1 %. При этом ледовитость оказалась минимальной за весь период наблюдений (117 лет).

районов и их число, так и источники получения необходимой исходной информации (версии ERSST.v2., ERSST.v3 и ERSST.v3b) [5]. Необходимые исходные данные о температуре воды на разрезе Кольский меридиан в Баренцевом море взяты на официальном сайте ПИНРО [7]. Данные о гидрометеорологических характеристиках по четырем районам Северо-Западной Атлантики предоставлены ПИНРО в рамках договора «Норд». В качестве примера в табл. 1 представлены общие сведения о числе оперативных и опытных прогнозов, составленных авторами в 2015—2016 гг.

Оценка оправдываемости прогнозов проведена строго согласно руководству «Наставления» [4], т.е. значения годовых прогнозов оценивались относительно  $\pm\sigma$  (среднее квадратическое отклонение от нормы), а квартальных — относительно  $0,8\sigma$ , рассчитываемых за период с 1981 по 2010 г.

В целом, оправдываемость оперативных квартальных прогнозов ТПО для Норвежского моря и вышеуказанных районов Северо-Восточной Атлантики за 1986 — 2016 гг. по знаку аномалии составила 98 %, а по величине относительно  $\pm 0,8\sigma$  — 78 %; (необходимо указать, что для отдельных районов допустимая погрешность ТПО, равная  $0,8\sigma$ , составляет  $\pm 0,2$  °C).

Оправдываемость оперативных квартальных прогнозов температуры воздуха, ледовитости и ТПО (с годовой заблаговременностью) для вышеуказанных районов Северо-Западной Атлантики за 2013 — 2016 гг. по знаку аномалии составила 96 %, по величине относительно  $\sigma$  — 81 %;

Оправдываемость по величине оперативных прогнозов среднегодовой температуры воды в слое 0—200 м на разрезе Кольский меридиан за 1986—2016 гг. составила 89 % (при заблаговременности 1 год) и 86 % (при заблаговременности 2 года); для аналогичных опытных прогнозов среднемесячной температуры на разрезе Кольский меридиан за 2005—2013 гг. оправдываемость составила 93 % (при заблаговременности 1 год) и 83 % (при заблаговременности 2 года). Эффективность методических прогнозов по отношению к климатическим составила 35—45 %.

В целом, следует отметить, что методические прогнозы характеризуются более высокой эффективностью (до 45 %) относительно климатических и инерционных прогнозов. Достаточно высокая эффективность относительно климатических прогнозов отмечается и у инерционных прогнозов (22—33 %), что обусловлено естественными причинами — наблюдающимся в последние годы потеплением и сохранением сравнительно монотонно изменяющегося положительного теплового фона. Наиболее ярко это выражено в случае квартальных прогнозов, охватывавших временной отрезок последних десяти лет.

На протяжении последних лет, помимо прогнозов среднемесячной температуры воды, по разрезу Кольский меридиан в слое 0—200 м с заблаговременностью один-два года выполнялась опытная экстраполяция и верификация аналогичных прогнозов с заблаговременностью до четырех лет. Исходными данными для анализа и прогноза послужили временные серии данных о температуре воды в слое 0—200 м на разрезе Кольский меридиан (станции 3—7) среднемесячной дискретности за период 1951—2015 гг. Прогнозы составлялись на каждый календарный месяц с заблаговременностью один и два года и в тестовом режиме на период до четырех лет. Увеличение заблаговременности достигалось соответствующей

подготовкой исходной информации: проводилось скользящее двухлетнее осреднение среднемесячных значений температуры воды с отнесением полученного значения к концу срока осреднения. В этом случае прогноз температуры воды на два шага вперед характеризовал сглаженную осреднением тенденцию изменения теплового состояния вод на последующие четыре года.

Возможно, в этом случае следовало бы ввести понятие «модельной» заблаговременности, которая показывала бы, на какое число шагов составлен прогноз. При двухлетнем осреднении прогноз составляется также на один и два шага вперед, но характеризует изменение теплового состояния вод на протяжении последующих четырех лет. Таким образом, на каждый текущий календарный год (рис. 1) в распоряжении эксперта есть четыре прогноза, составленных в разное время (от одного года до четырех лет назад) по рядам разной дискретности (один и два года) и разной заблаговременности (от одного года до четырех лет).

Опытное прогнозирование среднемесячных значений температуры воды в слое 0—200 м на разрезе Кольский меридиан на 2015 г. показало хорошую оправдываемость прогностических значений, которая составила 100 % по знаку и от 80 до 100 % по численным значениям (см. табл. 1, рис. 1 и 2). Таким образом, подтвердилось предположение о том, что теоретическая предельная заблаговременность прогнозирования гидрометеорологических характеристик статистико-вероятностными методами может достигать четырех лет.

Результаты опытных прогнозов среднемесячной температуры воды на разрезе Кольский меридиан с заблаговременностью от одного до четырех лет представлены на рис. 2.

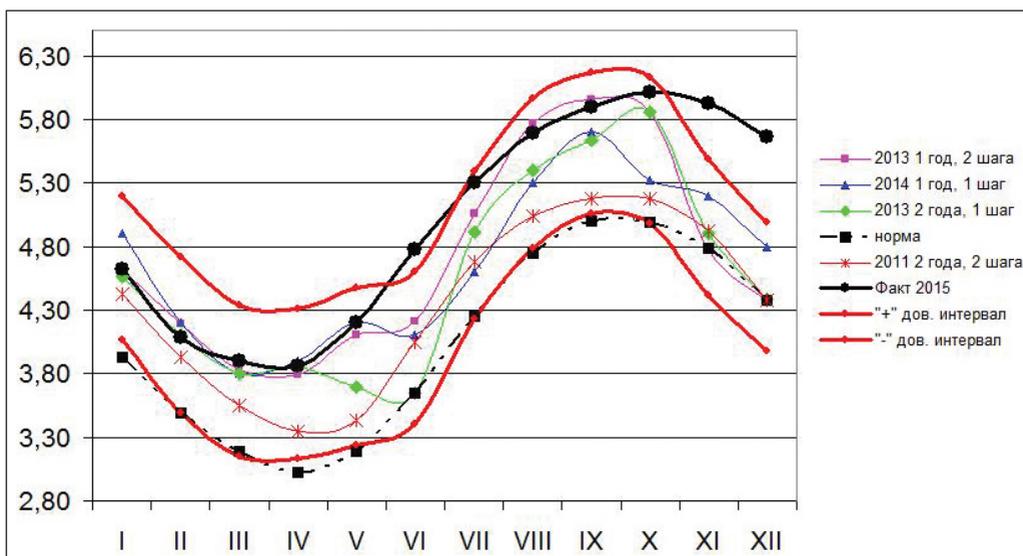


Рис. 1. Опытные прогнозы среднемесячной температуры воды в слое 0—200 м на разрезе Кольский меридиан по данным станций 3—7 заблаговременностью 1—4 года на 2015 г., составленные в 2011—2014 гг.

Из рисунка видно, что в ноябре и декабре отмечается практически «нормальное» термическое состояние вод на разрезе Кольский меридиан на протяжении 2015—2018 гг., а в остальные месяцы календарного года — повышенный термический фон.

В целом, высокая эффективность (до 45 %) прогнозов при использовании статистико-вероятностных методов свидетельствует об их успешности. В то же время, следует иметь в виду, что статистико-вероятностные модели основаны только на учете колебаний, имеющихся в исходных рядах, поэтому точно количественно предсказать новые экстремальные значения (новый абсолютный максимум или минимум) с их помощью не всегда представляется возможным.

Следует остановиться еще на одном моменте. Как уже указывалось ранее, различия между первоначальным значением ТПО (получаемой оперативно по версии v3b и обычно используемой при составлении, в частности, квартальных прогнозов) и уточненным ее значением могут достигать  $\pm 0,2$  °C. Это различие, естественно, сказывается на результатах оценки оправдываемости прогнозов, так как в подавляющем большинстве случаев значения, превышающие допустимую погрешность, также составляют  $\pm 0,1 \dots \pm 0,2$  °C. Такие же погрешности в большинстве случаев присущи неоправдавшимся прогнозам тепловых характеристик при других масштабах осреднения.

Кроме того, значения среднего квадратического отклонения и нормы на протяжении рассматриваемого временного интервала испытывают существенные изменения. В качестве примера на рис. 3 представлены результаты скользящего тридцатилетнего осреднения для временных рядов среднегодовой температуры

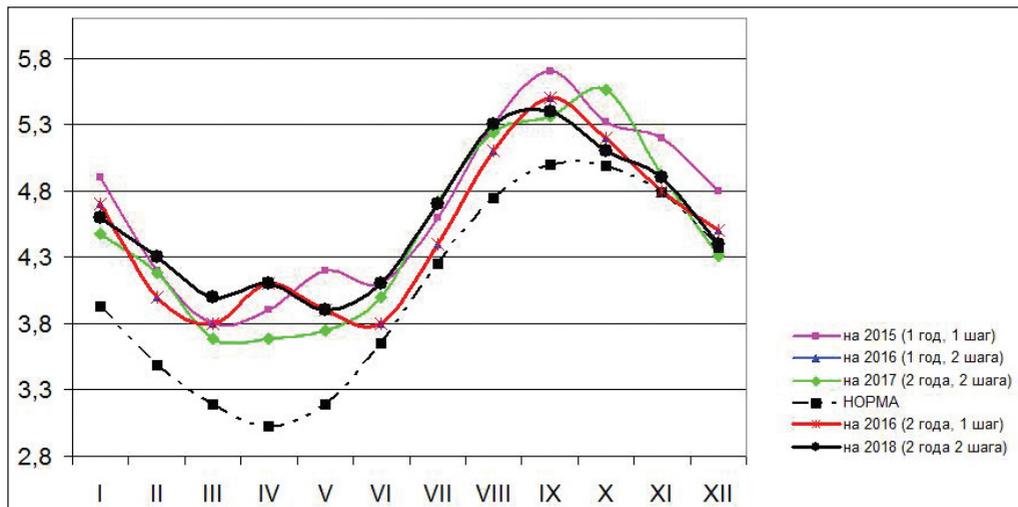


Рис. 2. Опытные прогнозы среднемесячной температуры воды в слое 0—200 м на разрезе Кольский меридиан по данным станций 3—7 на 2015—2018 гг. с заблаговременностью 1—4 года, составленные в 2013 г. (один прогноз) и 2014 г. (четыре прогноза).

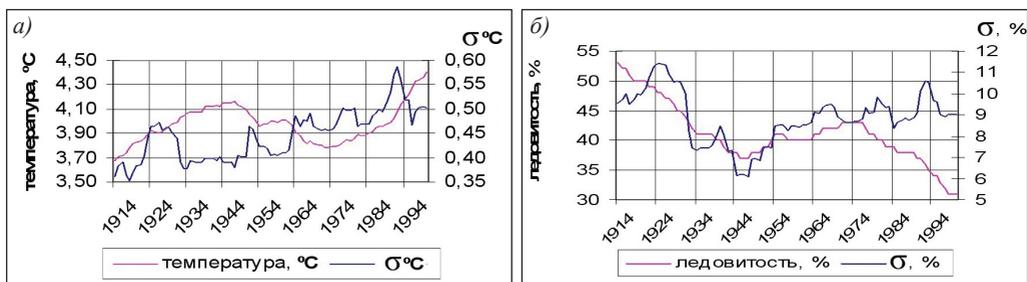


Рис. 3. Скользящее 30-летнее осреднение температуры воды и ее среднего квадратического отклонения в слое 0—200 м на разрезе Кольский меридиан (а) и аналогичное осреднение ледовитости Баренцева моря (б). Год указывает середину 30-летнего интервала осреднения.

воды на разрезе Кольский меридиан и ледовитости Баренцева моря, а также значений их среднего квадратического отклонения за период 1900—2015 гг. Так, норма температуры воды изменялась от 4,4 до 3,7 °C, а среднеквадратическое отклонение — от 0,6 до 0,4 °C, т.е. значение допустимой погрешности для оценки оправдываемости прогнозов колебалось в тех же пределах 0,2 °C.

Для ледовитости характерен следующий размах колебаний: по величине — от 53 до 31 %, по среднеквадратическому отклонению — от 11 до 6 %. Как видим, в течение рассматриваемого периода (116 лет) эти характеристики существенно различались, что приводило и к изменению допустимой погрешности составленных прогнозов. При этом последние десятилетия относятся к периоду значительного изменения климата и отмечены наибольшей изменчивостью тепловых характеристик в Северной Атлантике и Баренцевом море.

### **Заключение**

Как было сказано выше, погрешность данных используемых временных рядов, полученных путем реанализа или другой дополнительной математической обработки, применительно, в частности, к температуре воды составляет не менее  $\pm 0,2$  °C. Анализ оценок оправдываемости долгосрочных и сверхдолгосрочных прогнозов тепловых характеристик, проведенный в строгом соответствии с Наставлением [4], показал, что в подавляющем числе случаев значения погрешности, характерные для неоправдавшихся прогнозов, также не превосходят  $\pm 0,2$  °C. Иными словами, разность прогнозируемого значения температуры воды и используемого в дальнейшем для оценки оправдываемости прогноза ТПО (результаты реанализа или применения других математических приемов) соизмерима с величиной критерия оправдываемости (относительно  $\sigma$ ) в соответствии с Наставлением [4]. Оценивая оправдываемость прогноза (или качество использованной для его составления методики), в подобном случае необходимо учитывать точность имеющихся исходных данных. Без такого учета невозможно сделать корректное заключение относительно эффективности методик прогнозирования и фактической оправдываемости прогнозов. Поэтому предлагается оценку оправдываемости прогнозов проводить

с учетом точности используемой исходной информации. В частности, при оценке оправдываемости рассмотренных выше прогнозов тепловых характеристик следует учитывать возможную погрешность исходных материалов ТПО, составляющую не менее  $\pm 0,2$  °С, увеличивая на это значение допустимую погрешность.

В то же время, возникает вопрос относительно необходимой точности прогнозирования гидрометеорологических характеристик применительно к решению конкретных производственных задач, например при составлении рыбопромысловых рекомендаций и прогнозов. Насколько важны в подобных случаях температурные различия, равные  $\pm 0,2$  °С? Возможно, целесообразно введение дополнительного критерия оценки успешности прогноза, в частности, температуры воды, численное значение которого не превышает допустимой погрешности более чем на  $\pm 0,2$  °С. Считаем необходимым обсуждение этих вопросов с привлечением непосредственных пользователей результатов прогнозирования гидрометеорологических условий для рыбопромысловых целей.

#### Список литературы

1. *Аверкиев А.С., Булаева В.М., Густоев Д.В., Карпова И.П.* Методические рекомендации по использованию метода сверхдолгосрочного прогнозирования гидрометеорологических элементов (МСПГЭ) и программного комплекса «Призма». — Мурманск: изд-во ПИНРО, 1997. 40 с.
2. *Бойцов В.Д., Карсаков А.Л., Аверкиев А.А., Густоев Д.В., Карпова И.П.* Исследование изменчивости гидрофизических характеристик по наблюдениям на разрезе «Кольский меридиан» // Ученые записки РГГМУ. 2010. № 15. С. 135—149.
3. *Густоев Д.В., Карпова И.П., Аверкиев А.С.* О возможности увеличения заблаговременности морских прогнозов статистико-вероятностными методами / Материалы XIV Конференции по промысловой океанологии и промышленному прогнозированию. Тезисы докладов. — Калининград: изд-во АтлантНИРО, 2008. С. 60—62.
4. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. — М.: ТРИАДА ЛТД, 2011. 189 с.
5. <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCDC/.ERSST/.version3b/.sst/> [электронный ресурс]
6. [http://cimss.ssec.wisc.edu/dbs/China2011/Day2/Lectures/MODIS\\_MOD28\\_SST\\_Reference.pdf](http://cimss.ssec.wisc.edu/dbs/China2011/Day2/Lectures/MODIS_MOD28_SST_Reference.pdf) [электронный ресурс]
7. <http://www.pinro.ru/15/index.php/ru/structure/labs/labhidro/kolasection> [электронный ресурс]