

С. М. Гордеева, В. Н. Малинин, П. П. Чернышков

**ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ
ВОДЫ В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА**

28

Рассматриваются результаты использования физико-статистического метода в прогнозе сезонного хода температуры поверхности океана (ТПО) с заблаговременностью 8 месяцев и статистического метода сверхдолгосрочного прогноза ТПО с заблаговременностью 1 год. В первом случае среднеквадратическая ошибка прогноза ТПО на независимых данных составляет 0,5 °С, во втором случае – 0,2 °С, что значительно меньше допустимой ошибки и удовлетворяет практическим требованиям.

The article examines the results of use of the physical-statistical method for the forecast of seasonal trend of the sea surface temperature (SST) with the lead time of 8 months and results of statistical method of SST superlong-term forecast, lead time – 1 year. In the first case mean-squared prediction error of SST according to independent data makes 0,5 °C, in the second case – 0,2 °C, that is much less than the reasonable mistake and meets practical requirements.

Ключевые слова: сезонные изменения температуры, статистические методы, долгосрочный прогноз.

В течение 80-х гг. XX в. юго-восточная часть Тихого океана (ЮВТО) являлась важнейшим районом широкомасштабного промысла – главным образом ставриды, вылов которой отечественными судами достигал 1 млн т в год. Однако в 1992 г. в связи с переходом экономики страны на рыночные отношения, приведшие к резкому увеличению стоимости топлива и себестоимости работы траулеров в отдаленных океанических районах, промысел в ЮВТО был полностью прекращен. В настоящее время стало очевидно, что вследствие истощения рыбных запасов в районах традиционного промысла обеспечение населения страны рыбной продукцией практически невозможно без возобновления промысла в открытой части Мирового океана, и прежде всего в юго-восточной части Тихого океана.

В связи с этим чрезвычайно актуальной представляется задача прогноза возможных промысловых запасов рыбы и факторов, их определяющих. Поскольку важнейшим абиотическим фактором, в значительной степени определяющим формирование биопродуктивности вод океана, является температура воды, то ее долгосрочный прогноз имеет важнейшее практическое значение. С учетом того, что подавляющие запасы ставриды сосредоточены в пределах 100-метрового слоя, т.е. в верхнем квазиоднородном слое, то достаточно ограничиться температурой поверхности океана (ТПО). При этом задачу прогноза ТПО целе-



сообразно разделить на две части: прогноз сезонного хода и прогноз с заблаговременностью 1–2 года.

На наш взгляд, для прогноза сезонного хода ТПО в ЮВТО может быть использован хорошо зарекомендовавший себя физико-статистический метод [2–4]. Суть этого метода состоит в том, что вначале устанавливаются физические связи функции отклика с определяющими факторами, а затем уже на статистической основе строится прогностическая модель, заблаговременность которой зависит от инерционности воздействующих на изучаемый процесс факторов. В данном случае физической основой является уравнение теплового баланса верхнего слоя океана. При этом основными факторами, непосредственно влияющими на колебания ТПО, выступают компоненты теплового баланса. К вторичным факторам, определяющим формирование самих компонент теплового баланса и, следовательно, опосредованно воздействующим на ТПО, относятся перепад температуры в приводном слое атмосферы и скорость ветра, определяющие колебания потоков явного и скрытого тепла, а также облачность, влагосодержание, прозрачность, температура и ряд других атмосферных характеристик, формирующих радиационный баланс.

Использование данного метода для районов интенсивного промысла показало, что для области Канарского апвеллинга стандартная ошибка опытных (независимых) прогнозов сезонного хода ТПО с заблаговременностью 9 месяцев составляла 0,74 °C [3], а для области Бенгельского апвеллинга она изменялась в пределах от 0,5 до 0,8 °C [2]. Еще меньшая ошибка отмечалась для очень сложного в океанологическом отношении Норвежского моря (от 0,50 до 0,55 °C) [4].

Информационной основой для прогноза ТПО в данной работе стали архивы NOAA OI.v2 SST [7] и CDAS [6]. Последний содержит все компоненты внешнего теплового баланса поверхности океана и разнообразные метеорологические характеристики.

Учитывая огромную протяженность ЮВТО, разработка долгосрочного прогноза ТПО для всей области вряд ли имеет смысл. С практической точки зрения в южном подрайоне ЮВТО наибольший интерес представляет зона субтропического гидрологического фронта, к которой преимущественно приурочены промысловые запасы ставриды. Если ориентироваться на данные о промысле советских судов в ЮВТО, то с 1979 по 1991 г. промысловый флот чаще всего концентрировался вдоль 40° ю. ш. [5]. В частности, к числу наиболее посещаемых промысловыми судами районов относится район с центром 40° ю. ш. и 80° з. д., примыкающий к экономической зоне Чили. Поэтому рассмотрим долгосрочный прогноз сезонного хода ТПО физико-статистическим методом для квадрата 38–42° ю. ш. и 78–82° з. д.

Для оценки естественной (природной) заблаговременности прогноза ТПО был выполнен расчет взаимнокорреляционных функций среднемесячных значений ТПО в рассматриваемом квадрате с компонентами внешнего теплового баланса (суммарная радиация Q , отраженная радиация S , приток коротковолновой радиации $Q-C$, собственное излучение океана, противоизлучение атмосферы, эффективное излучение, радиационный баланс, потоки явного и скрытого тепла, внешний тепловой баланс), а также метеорологическими характеристиками (облачность, давление, зональная и меридиональная компоненты скорости ветра, удельная влажность, температура воздуха, осадки).



В результате расчетов установлено, что годовой ход ТПО имеет сдвиг в 2 месяца в экстремумах по отношению к радиации и другим метеорологическим характеристикам. Следовательно, сдвиг 2 месяца — это период адаптации ТПО, ее естественная реакция на климатический сигнал, внешнее возмущение. Однако такой сдвиг слишком мал с точки зрения прогноза ТПО. Естественно, что через полупериод, т.е. через 8 месяцев, происходит восстановление связей с противоположным знаком. Поэтому именно сдвиг 8 месяцев с практической точки зрения имеет более важное прогностическое значение.

Для построения прогностической модели ТПО в качестве зависимой выборки были выбраны среднемесячные значения всех характеристик за период с 1982 по 2002 г. Данные за период с 2003 по 2007 г. использовались для независимой проверки прогноза.

На рисунке 1 приводится график связи между ТПО и радиационным балансом поверхности океана (R_0) при запаздывании ТПО на 8 месяцев.

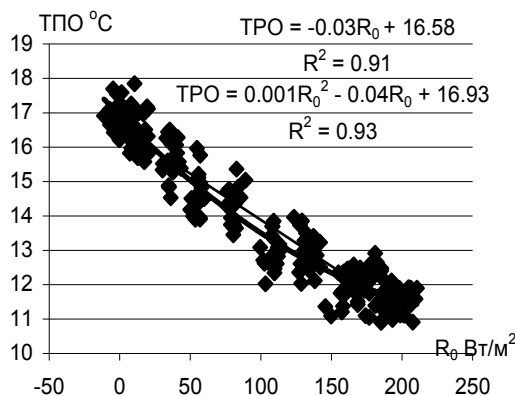


Рис. 1. График связи между радиационным балансом поверхности океана (R_0) и ТПО при ее запаздывании относительно R_0 на 8 месяцев

Нетрудно видеть, что между R_0 и ТПО отмечается относительно слабо выраженная нелинейная связь, коэффициент детерминации которой составляет $R^2 = 0,93$. Он выше линейного коэффициента детерминации на 0,02. Поскольку связи ТПО с другими компонентами теплового баланса океана и метеорологическими характеристиками оказались незначимыми и не вошли в оптимальную прогностическую модель регрессии для ТПО, то она имеет простой вид:

$$\text{ТПО}_{(i+8)} = b_0 - b_1R_{0i} + b_2R_{0i}^2. \quad (1)$$

Основные статистические параметры этой зависимости, рассчитанные по зависимой выборке, приводятся в таблице 1. Как и следовало ожидать, модель (1) обладает высокими в статистическом плане оценками и адекватна по критерию Фишера в прогностическом смысле [4]. Стандартная ошибка модели оказалась сравнительно небольшой и составляет 0,52 °С (см. табл. 1), причем она значительно меньше стандартного отклонения ТПО ($\sigma_y=2,0$ °С).



Учитывая высокие инерционные свойства ТПО, было принято решение оценить возможность их использования для прогноза ТПО. С этой целью проверялась линейная модель с заблаговременностью прогноза 12 месяцев, параметры которой также представлены в таблице 1 и несколько уступают модели (1):

$$\text{ТПО}_{(i+12)} = b_0 + b_1 \text{ТПО}_i. \quad (2)$$

Проверка прогностических моделей (1) и (2) осуществлялась на независимых данных за период с 2003 по 2007 г. Для модели (1) среднеквадратическая ошибка прогноза среднемесячных значений ТПО составила $\sigma_\varepsilon = 0,53$ °С, а для модели (2) стандартная ошибка оказалась несколько больше: $\sigma_\varepsilon = 0,68$ °С. Для модели (1) максимальные ошибки отмечаются в октябре, минимальные – в феврале, а для модели (2) максимальные ошибки наблюдаются в декабре, а минимальные – в сентябре. Сопоставление среднемесячных вычисленных и фактических значений ТПО по модели (1) за 2003–2007 гг. дается на рисунке 2.

Таким образом, учет нелинейной связи между ТПО и радиационным балансом имеет преимущества перед инерционным прогнозом и обеспечивает получение надежных в прогностическом смысле среднемесячных значений ТПО с заблаговременностью 8 месяцев.

Таблица 1

Оценки параметров регрессионных моделей прогноза сезонной ТПО по зависимой (с 1982 по 2002 г.) и независимой (с 2003 по 2007 г.) выборкам

Показатель	Модель (1)	Модель (2)
Коэффициент детерминации, R^2	0,93	0,91
Критерий Фишера, F	1657	3001
Стандартная ошибка модели, $\sigma_{y(x)}$, °С	0,52	0,55
Значимость коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента, p-level(max)	10^{-13}	0,09
Стандартное отклонение ТПО, σ_y , °С	2,02	2,02
Стандартная ошибка независимого прогноза, σ_ε , °С	0,53	0,68

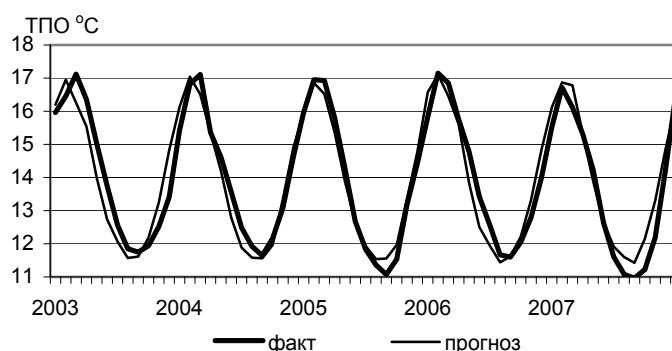


Рис. 2. Сопоставление среднемесячных вычисленных и фактических значений ТПО по модели (1) за период с 2003 по 2007 г.



Рассмотрим теперь задачу сверхдолгосрочного прогноза ТПО. С этой целью был выполнен взаимнокорреляционный анализ среднегодовых значений ТПО с различными крупномасштабными параметрами: компоненты теплового баланса океана, индекс южного колебания, индекс антарктического колебания в Тихоокеанском регионе, давление в центре южнотихоокеанского антициклона (ЮТА) и его пространственные миграции, характеристики южного субтропического фронта (ЮСФ) и др.

В частности, была выявлена значимая корреляция ТПО со смещениями ЮТА по широте с запаздыванием ТПО на 1 и 2 года. В результате прогностическая модель для ТПО имела вид:

$$\text{ТПО}_i = b_0 + b_1\varphi_{i-1} + b_2\varphi_{i-2}, \quad (3)$$

где φ – средняя годовая широта ЮТА,

i – сдвиг в годах.

Характеристики модели (3) представлены в таблице 2.

Таблица 2

Оценки параметров регрессионных моделей прогноза годовой ТПО по зависимой (с 1982 по 2002 г.) и независимой (с 2003 по 2006 г.) выборкам

Показатель	Модель (3)	Модель (4)
Коэффициент детерминации, R^2	0,37	0,69
Критерий Фишера, F	4,79	12,0
Стандартная ошибка модели, $\sigma_{y(x)}$, °С	0,24	0,19
Значимость коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента, p -level(max)	0,04	0,02
Стандартное отклонение ТПО, σ_y , °С	0,30	0,30
Стандартная ошибка независимого прогноза, σ_{φ} , °С	0,19	0,24

Согласно полученной зависимости, смещение ЮТА на север создаст благоприятные условия для последующего повышения ТПО в исследуемом квадрате. Несмотря на относительно невысокий коэффициент детерминации, прогноз по независимым данным для периода с 2003 по 2006 г. оказался достаточно успешным и показал, что его стандартная ошибка составила $\sigma_e = 0,19$ °С, причем максимальная ошибка наблюдалась в 2003 г. и была равна 0,30 °С.

Поскольку статистические параметры модели (3), особенно по зависимой выборке, являются не очень надежными, поиск других прогностических зависимостей был продолжен. В результате расчетов установлено, что значимый коэффициент корреляции на прогностическом сдвиге 1 год отмечается между ТПО и смещениями по широте ЮСФ. Положение ЮСФ было выделено в поле температуры поверхности океана с шагом 1° по широте и 2° по долготе за период с 1982 по 2006 г. для пространственной области, ограниченной 99,5° и 77,5° з. д. и 20,5° и 49,5° ю. ш. На рисунке 3 приводится среднегодовое положение и квантильный анализ межгодовых колебаний ЮСФ [1]. Нетрудно видеть, что ЮСФ пересекает рассматриваемый нами квадрат ЮВТО.

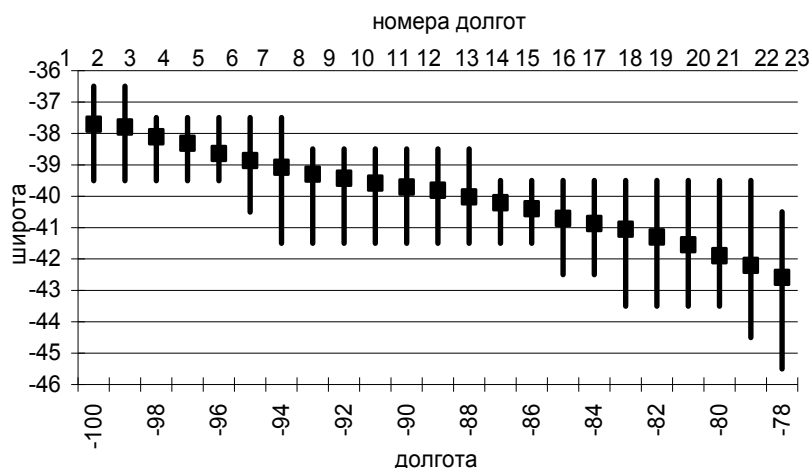


Рис. 3. Среднегодовое положение и квантильный анализ межгодовых колебаний южного субтропического фронта [1]

Прогностическая зависимость ТПО с заблаговременностью в 1 год рассчитывалась на основе метода включения переменных пошагового алгоритма множественной модели линейной регрессии. Предикторами являлись среднегодовые значения смещений ЮСФ по широте, общее число которых составило $m=23$. Оптимальная регрессионная модель для зависимой выборки (1982 – 2002 гг.) имеет вид:

$$ТПО_{i+1} = b_0 + b_1L_{4i} + b_2L_{12i} - b_3L_{11i}, \tag{4}$$

где i – сдвиг в годах,

$L_4 L_{12} L_{11}$ – смещение фронта на долготе 96,5 з. д., 88,5 з. д. и 89,5 з. д. соответственно.

Из модели (4) следует, что смещения ЮСФ к югу вызывают повышение ТПО через 1 год. Статистические оценки параметров этой зависимости также приведены в таблице 2. Легко заметить, что параметры модели (4) по зависимой выборке существенно лучше по сравнению с моделью (3), однако точность прогностических оценок ТПО за 2003 – 2006 гг. по обеим моделям примерно одинакова.

На рисунке 4 приводится сопоставление фактических и вычисленных среднегодовых значений ТПО. К сожалению, независимая выборка слишком коротка, поэтому можно сделать лишь предварительные выводы. Максимальная ошибка отмечается в 2005 г., когда прогностическое значение ТПО выше ее фактического значения на 0,37 °С. В остальные годы расхождения между ними меньше стандартного отклонения ТПО ($\sigma_y = 0,30$ °С). Среднеквадратическая ошибка прогноза годовых значений ТПО составила $\sigma_e = 0,24$ °С, т.е. фактически была на уровне аналогичной ошибки по зависимой выборке. Очевидно, что если бы эти оценки были получены по более длинной независимой выборке, то полученные результаты прогноза среднегодовых значений ТПО можно было бы считать вполне приемлемыми с практической точки зрения.

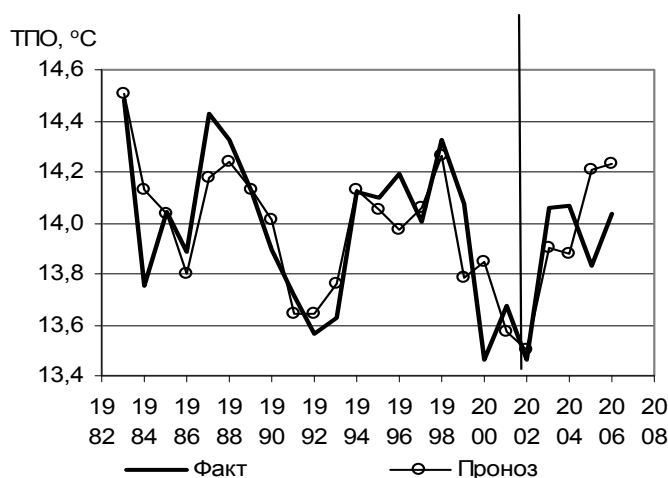


Рис. 4. Сопоставление вычисленных и фактических значений среднегодовых ТПО по модели (4) за период с 1983 по 2006 г.

Список литературы

1. Гордеева С.М., Малинин В.Н. Крупномасштабная изменчивость южного субтропического фронта в юго-восточной части Тихого океана // Учен. записки. 2006. Вып. 2. С. 130–139.
2. Малинин В.Н. О перспективах использования физико-статистического метода долгосрочного прогноза температуры воды в промышленных районах Атлантики // Вопросы промышленной океанологии. Вып. 1. М.: Изд-во ВНИРО, 2004. С. 261–274.
3. Малинин В.Н., Чернышков П.П., Гордеева С.М. Канарский апвеллинг: крупномасштабная изменчивость и прогноз температуры воды. СПб.: Гидрометеопиздат, 2002.
4. Малинин В.Н., Гордеева С.М. Физико-статистический метод прогноза океанологических характеристик (на примере Северо-Европейского бассейна). Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2003.
5. Малинин В.Н., Чернышков П.П., Гордеева С.М. О проблеме долгосрочного прогноза ставриды в юго-восточной части Тихого океана // Вопросы промышленной океанологии. 2007. Вып. 4, №1. С. 52–62.
6. Kalnay E.M. [et al]. The NMC/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. 77. P. 437–471.
7. Reynolds R.W. [et al]. An Improved In Situ and Satellite SST Analysis for Climate // J. Climate. 2002. № 15. P. 1609–1625.

Сведения об авторах

С.М. Гордеева – РГГМУ, Санкт-Петербург, gordeeva@rshu.ru
В.Н. Малинин – д-р геогр. наук, проф., РГГМУ, Санкт-Петербург, malinin@rshu.ru
П.П. Чернышков – д-р геогр. наук, проф., АтлантНИРО, Калининград, ptchern@atlant.baltnet.ru