

УДК 551.583

## Сверхдолгосрочный прогноз температуры воздуха в пограничном слое атмосферы на основе динамико-стохастического подхода

**В.С. Комаров, А.В. Лавриненко, С.Н. Ильин\***

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 22.08.2011 г.

Рассматривается возможность использования двумерной динамико-стохастической модели для сверхдолгосрочного прогноза, с заблаговременностью один год, температуры воздуха в пограничном слое атмосферы. Оценка качества прогноза проведена по данным многолетних, с 1973 по 2010 г., среднегодовых и среднесезонных (зима и лето) наблюдений за температурой воздуха для 6 станций Сибирского региона: Диксон, Тикси, Салехард, Омск, Чита, Якутск.

*Ключевые слова:* сверхдолгосрочный динамико-стохастический прогноз, температура воздуха, пограничный слой атмосферы, Сибирский регион; superlong-term dynamic-stochastic forecast, air temperature, Siberian region.

### Введение

Известно, что актуальность метеорологических прогнозов с годовой заблаговременностью определяется их исключительной значимостью, поскольку многие хозяйственные циклы имеют длительность в один год. Прогноз с заблаговременностью 1 год принято относить к категории сверхдолгосрочных прогнозов [1]. Однако прогнозы метеорологических величин и явлений погоды на месяц, на сезон и далее являются ненадежными и не удовлетворяют требованиям практики [2]. Обычно при сверхдолгосрочном прогнозе в качестве прогнозируемого параметра используются не сама метеорологическая величина, а знак и величина аномалии от заданного среднего климатического значения.

В основу большинства методик положен принцип комплексирования предикторов, что является характерной чертой почти всех современных методов сверхдолгосрочных метеорологических прогнозов. В качестве предикторов используются индексы циркуляции, типы атмосферных процессов, гидродинамические характеристики Атлантического, Северного Ледовитого и Тихого океанов, средняя месячная температура почвы, месячные осадки и пр. [3]. В настоящее время продолжают поиск основных погодообразующих факторов и их количественная оценка с точки зрения целесообразности использования в схеме сверхдолгосрочного метеорологического прогноза.

При решении проблемы сверхдолгосрочного метеорологического прогноза широко используются гидродинамические, эмпирико-статистические и синоптические методы [2, 3]. Тем не менее эффективность методов сверхдолгосрочных прогнозов продолжает оставаться низкой. Поскольку эта проблема до сих пор еще не решена, то представляется необходимым использовать различные возможности и способы повышения эффективности методов сверхдолгосрочного прогноза.

В настоящей статье содержатся результаты исследования по разработке методики сверхдолгосрочного прогноза температуры с заблаговременностью 1 год на основе динамико-стохастического подхода, реализованной на примере данных пограничного слоя атмосферы (ПСА) для территории Сибирского региона.

В качестве исходной математической модели, как основы для получения сверхдолгосрочного прогноза, нами использовалась двумерная динамико-стохастическая модель регрессионного типа (она впервые предложена в работе [4]), которая была применена в алгоритме сверхкраткосрочного прогноза параметров состояния пограничного слоя атмосферы.

Возможность использования той же модели для сверхдолгосрочного прогноза можно объяснить следующим образом. Динамико-стохастический подход, примененный в алгоритме работы предложенной двумерной модели, основан на учете статистических свойств исходных метеорологических рядов, которые использованы для реализации процедуры прогноза с заданной заблаговременностью. При этом взятая модель не связана с физическим пред-

\* Валерий Сергеевич Комаров (gfm@iao.ru); Андрей Викторович Лавриненко; Сергей Николаевич Ильин.

ставлением о природе и специфических свойствах микро- или макрометеорологических образований и базируется только на анализе статистических свойств предшествующих прогнозу рядов, что характерно для данного класса моделей, например МГУА [5].

## 1. Постановка задачи и методика ее решения

Для сверхдолгосрочного прогноза температуры воздуха в пограничном слое атмосферы нами была использована двумерная динамико-стохастическая модель вида [4]:

$$\xi_{h,k} = \sum_{m=h-i}^{h+i} \sum_{j=1}^K d_{m,j} \cdot \xi_{m,k-j} + \varepsilon_{h,k}, \quad (1)$$

где  $\xi_{h,k}$  — значение усредненной за год (или сезон) метеорологической величины  $\xi$  на высоте с индексом  $h$  и привязанной к моменту времени  $k$ ;  $\xi_{m,k-j}$  — усредненные значения той же метеорологической величины, на тех же интервалах и на высотах с индексами от  $h-i$  до  $h+i$  и привязанные к моментам времени с  $k-1$  по  $k-K$  (здесь  $m$  — номер текущей высоты в пределах заданного слоя атмосферы;  $j$  — текущее значение дискретного времени);  $d_{m,j}$  — неизвестные параметры модели;  $\varepsilon_{h,k}$  — невязка модели, обусловленная стохастичностью атмосферных процессов.

При этом применение в выражении (1) сдвоенной суммы позволяет учесть совместное влияние временных и межуровневых корреляционных связей усредненной температуры воздуха.

Наличие параметрической зависимости между значениями метеорологической величины  $\xi$  в момент времени  $k$  и в предшествующие моменты времени  $k-j$  не позволяет напрямую воспользоваться для прогноза выражением (1), так как параметры  $d_{m,j}$  неизвестны. В связи с этим задача сверхдолгосрочного прогнозирования распадается на два этапа. На первом из них по значениям усредненной за год или сезон метеорологической величины  $\xi$ , взятым с момента времени  $k$  по  $k-j$  на заданной высоте  $h$  и на соседних высотах, оцениваются параметры модели  $d_{m,j}$  с помощью линейного фильтра Калмана [6]. А на втором этапе, исходя из предположения о стационарности атмосферного процесса на рассматриваемом интервале заблаговременности, по оцененным параметрам  $d_{m,j}$  и прогностической модели вида

$$\xi_{h,k+1} = \sum_{m=h-i}^{h+i} \sum_{j=0}^{K-1} d_{m,j} \cdot \xi_{m,k-j} \quad (2)$$

осуществляется сверхдолгосрочный прогноз этой метеорологической величины на момент времени  $k+1$ . Здесь  $\xi_{h,k+1}$  — оценка метеорологической величины  $\xi$  в момент времени  $k+1$ ;  $d_{m,j}$  — оцененные на  $k$ -м временном шаге неизвестные параметры модели.

Для оценки параметров модели  $d_{m,j}$ , в соответствии с [6], используются вектор состояния динамической системы, дискретную модель эволюции которого во времени можно записать с помощью выражения вида

$$\mathbf{x}_{k+1}^t = \Psi_k \cdot \mathbf{x}_k^t + \omega_k^t, \quad (3)$$

где  $\mathbf{x}_k^t = \|d_{0,1}, d_{0,2}, \dots, d_{2i+1,K}\|^T$  — «истинный» вектор состояния модели, включающий неизвестные параметры модели (1);  $\Psi_k$  — матрица перехода для дискретной системы, учитывающая зависимость между переменными состояния системы и их временной изменчивостью;  $\omega_k^t = \|\omega_1^t, \omega_2^t, \dots, \omega_n^t\|^T$  — вектор-столбец случайных возмущений системы (вектор шумов состояния), а также вектор «наблюдений», применяемый в алгоритме фильтра Калмана для оценки состояния системы и описываемый в общем случае аддитивной смесью полезного сообщения и ошибки наблюденного вектора:

$$\mathbf{y}_k^o = \xi_k^o = \mathbf{H}_k \cdot \mathbf{x}_k^t + \varepsilon_k^o, \quad (4)$$

где  $\mathbf{y}_k^o$  — вектор наблюдений, представляющий собой усредненное значение температуры воздуха на фиксированной высоте в момент времени  $k$ ;  $\mathbf{H}_k$  — вектор наблюдений, определяющий функциональную связь между «истинными» значениями переменных состояния и фактическими наблюдениями;  $\varepsilon_k^o$  — вектор ошибок наблюдений в момент времени  $k$  (шум наблюдений).

При сопоставлении выражений для прогностической модели (1) и вектора наблюдений модели (4) матрицу  $\mathbf{H}_k$  можно записать в виде

$$\mathbf{H}_k = [y_{0,k-1}, y_{0,k-2}, \dots, y_{0,k-K}, \dots, y_{2i+1,k-K}]. \quad (5)$$

Таким образом, выражения (1)–(5) полностью определяют процедуру применения двумерной динамико-стохастической модели и аппарата калмановской фильтрации в задаче сверхдолгосрочного прогноза усредненной метеорологической величины  $\xi$ , осуществляемого на заданной высоте  $h$  с заблаговременностью 1 год.

## 2. Результаты численных экспериментов по оценке эффективности сверхдолгосрочного прогноза

Как уже говорилось выше, в качестве исходного материала взяты не срочные данные наблюдений сети аэрологических станций, а усредненные, представленные среднегодовыми и среднесезонными значениями температуры воздуха, которые рассчитаны для четырех типичных высот ПСА: 0, 400, 800, 1600 м. При этом нами в качестве примера использованы данные таких станций, как Диксон и Тикси (полярные зоны Сибирского региона),

Салехард и Омск (субполярные и умеренные широты Западной Сибири), Якутск и Чита (те же широты, но Восточной Сибири).

Здесь следует подчеркнуть, что приведение исходных данных к системе учащенных геометрических высот 0, 400, 800, 1600 м осуществлялось с помощью процедуры линейной интерполяции на основе наблюдений за температурой воздуха, представленной на главных изобарических поверхностях (1000, 925, 850, 700 гПа) и уровнях особых точек.

Что касается самого сверхдолгосрочного прогноза среднегодовой и среднесезонной температуры воздуха, то он проводился с заблаговременностью 1 год, причем нами для сезонного прогноза взяты два сезона – зима и лето.

На рис. 1–3 приведены результаты сверхдолгосрочного прогноза (с заблаговременностью 1 год) среднегодовой и среднесезонной температуры для выбранных станций.

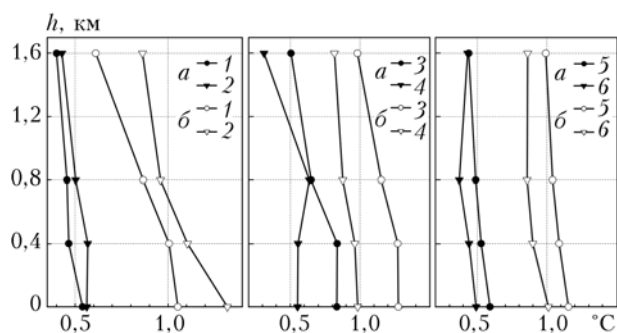


Рис. 1. Среднеквадратические ошибки (а) сверхдолгосрочного прогноза среднегодовой температуры с заблаговременностью 1 год, полученные для пограничного слоя атмосферы и типичных станций Сибирского региона: Диксона (1), Тикси (2), Салехарда (3), Омска (4), Якутска (5) и Читы (6), а также соответствующие стандартные отклонения (б)

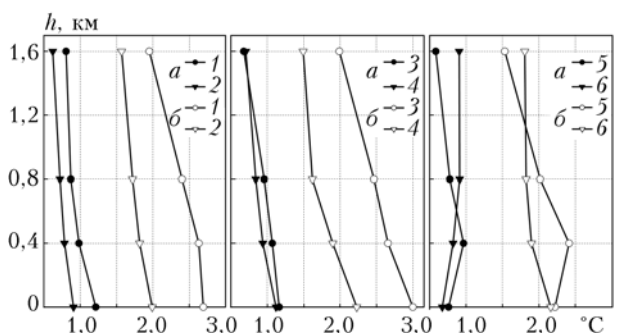


Рис. 2. Среднеквадратические ошибки (а) сверхдолгосрочного прогноза среднесезонной (зимней) температуры с заблаговременностью 1 год, полученные для пограничного слоя атмосферы и типичных станций Сибирского региона: Диксона (1), Тикси (2), Салехарда (3), Омска (4), Якутска (5) и Читы (6), а также соответствующие стандартные отклонения (б)

При этом исходная последовательность представляет собой ряд усредненных для каждого года среднегодовой и среднесезонной (для лета: июнь, июль и август; для зимы: декабрь, январь и фев-

раль) температуры воздуха, полученный для заданных аэрологических станций за период с 1973 по 2010 г.

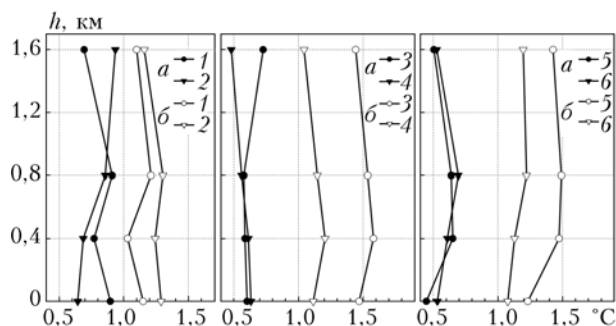


Рис. 3. Среднеквадратические ошибки (а) сверхдолгосрочного прогноза среднесезонной (летней) температуры с заблаговременностью 1 год, полученные для пограничного слоя атмосферы и типичных станций Сибирского региона: Диксона (1), Тикси (2), Салехарда (3), Омска (4), Якутска (5) и Читы (6), а также соответствующие стандартные отклонения (б)

Для оценки качества прогноза нами использованы среднеквадратические ошибки прогноза  $\delta_T$ , вычисленные на интервале с 1981 по 2010 г., т.е. на интервале современного глобального потепления [2, 3]. Кроме того, для сравнения полученных ошибок с величиной естественной изменчивости нами взяты также стандартные (среднеквадратические) отклонения  $\sigma$  температуры воздуха, соответствующие заданным станциям за рассматриваемый интервал времени.

Перейдем теперь непосредственно к рассмотрению качества сверхдолгосрочного прогноза.

Из рис. 1 следует, что величины среднеквадратических ошибок  $\delta_T$  сверхдолгосрочного прогноза среднегодовой температуры с заблаговременностью 1 год почти во всех случаях не превышают 0,6 °С (лишь в районе ст. Салехард они могут достигать 0,8 °С). Если вычислить относительную ошибку прогноза  $\theta$ , определяемую как отношение  $\theta = \delta_T / \sigma$ , то ее величина не будет превышать 65%, а в среднем составлять около 50%.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что алгоритм сверхдолгосрочного прогноза является достаточно эффективным и может быть с успехом использован на практике для оценки климатических изменений среднегодовой температуры на интервал 1 год.

На рис. 2 и 3 представлены результаты сверхдолгосрочного прогноза среднесезонных значений температуры воздуха, проведенного на примере двух основных сезонов (зимы и лета) с годовой заблаговременностью. Анализ рис. 2 и 3 показывает, что среднеквадратическая ошибка сверхдолгосрочного прогноза среднесезонной температуры существенно выше, чем для ее среднегодовых значений. Это связано, в первую очередь, с большей изменчивостью среднесезонных последовательностей по сравнению со среднегодовыми и соответственно с большим значением среднеквадратических

отклонений первых. Например, для зимнего сезона величина среднеквадратической ошибки не превышает  $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  для всех заданных станций и на всех выбранных высотах, в то время как значения стандартных отклонений варьируют в пределах от  $1,5$  до  $2,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Следовательно, относительная ошибка  $\theta$  нигде не превышает значения  $40\text{--}50\%$ .

Для летнего сезона величины среднеквадратических ошибок сверхдолгосрочного прогноза близки по абсолютной величине к среднегодовым значениям и не превышают  $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  (см. рис. 3). Однако имеется большая изменчивость в значениях относительной ошибки прогноза, которая варьируется от станции к станции от  $30$  до  $60\%$ .

Методика применения двумерной динамико-стохастической модели (1) в алгоритме сверхдолгосрочного прогноза в целом осталась такой же, как и в случае ее использования для сверхкраткосрочного прогноза, рассмотренного в работах [4, 7]. Однако был внесен ряд изменений, позволяющих существенно улучшить качество сверхдолгосрочного прогноза.

Предварительное исследование предложенной методики сверхдолгосрочного прогноза показало, что важную роль для повышения качества такого прогноза играет учет ряда влияющих факторов в части применения как самой модели, так и начальных условий инициализации фильтра Калмана. Среди факторов, существенно влияющих на итоговую ошибку прогноза, следует отметить:

- длительность временного интервала непрерывной работы фильтра Калмана;
- длину исходной выборки аэрологических наблюдений, используемой в качестве предиктора;
- значение диагональных элементов матрицы ковариации шумов наблюдения.

Под интервалом непрерывной работы мы понимаем интервал времени, в течение которого отдельный фильтр Калмана, построенный для текущего высотного уровня, не инициализируется повторно начальными условиями. Тем самым мы искусственно стимулируем алгоритм фильтра Калмана для отслеживания быстрых изменений исходного процесса. В нашем алгоритме реинициализация проводилась в заранее predeterminedных случаях, а также дополнительно в случае, когда абсолютная ошибка прогноза превышала некоторую установленную величину.

Длина исходной выборки, используемой в качестве предиктора, определяется значением переменной  $K$  в выражении (1) для динамико-стохастической модели сверхдолгосрочного прогноза.

Исходя из минимизации результирующей среднеквадратической ошибки сверхдолгосрочного прогноза с заблаговременностью 1 год, в алгоритме были использованы следующие параметры и начальные условия инициализации. Интервал непрерывной работы фильтра Калмана до очередной реинициализации составлял 9 лет, а порог, при превышении которого происходил вынужденный рестарт фильтра, –  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Длина исходной выборки  $K$ ,

используемая в качестве предиктора в алгоритме фильтра Калмана, равнялась 11 годам. Такое значение можно объяснить тем, что оно близко к длительности интервала возмущений солнечной активности, равной 11 годам [2]. И наконец, значения диагональных элементов матрицы ковариации шумов наблюдения были заданы равными  $R_{i,i} = 100$ .

С учетом сказанного, для дополнительной иллюстрации высокой эффективности работы примененного нами алгоритма сверхдолгосрочного прогноза на рис. 4 представлены в качестве примера временной ход фактических и спрогнозированных значений (с заблаговременностью 1 год) среднесезонной зимней температуры воздуха, полученный по данным аэрологической станции Омск для трех типичных высот (уровня земли, 800 и 1600 м), а также аналогичный ход ошибок ее сверхдолгосрочного прогноза.

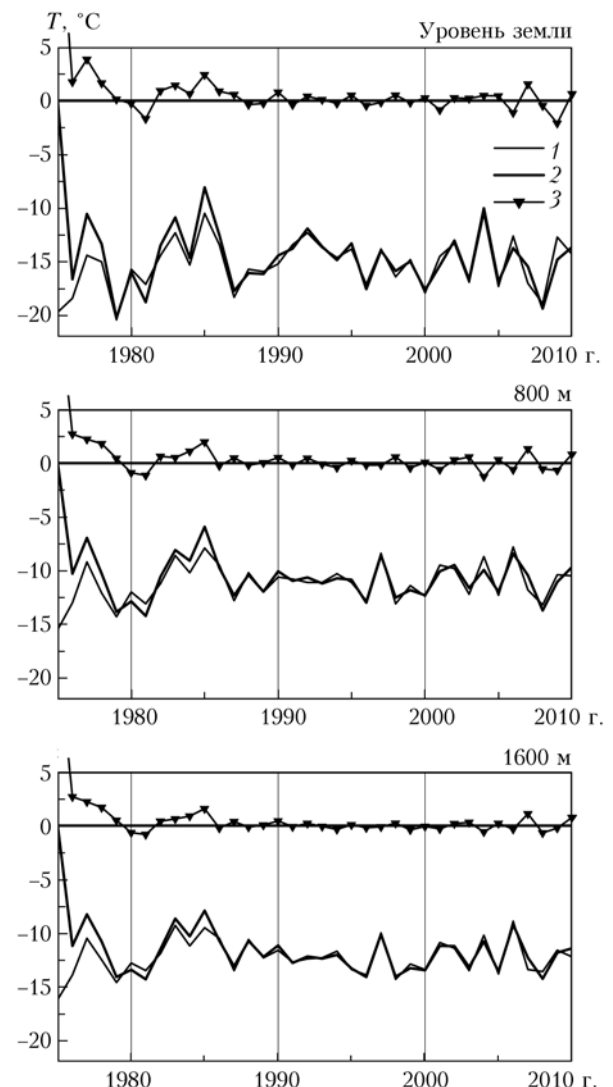


Рис. 4. Временной ход фактических (1) и спрогнозированных (с заблаговременностью 1 год) (2) значений среднесезонной (зимней) температуры, полученных по данным ст. Омск для уровня земли и высоты 800 и 1600 м, а также ход соответствующих ошибок прогноза (3)

На основе анализа рис. 4 можно констатировать, что в межгодовом ходе среднесезонной приземной температуры, построенной по данным ст. Омск, явно прослеживается тенденция похолодания, что характерно для станций юга Западной Сибири в зимний период [8]. Кроме того, на рис. 4 можно отметить явно выраженный переходный период работы алгоритма фильтра Калмана, который отмечается с 1973 по 1985 г. и влияет на величину предиктора алгоритма. Однако в целом качество сверхдолгосрочного прогноза на всех рассматриваемых уровнях довольно высокое, что подтверждается большой степенью совпадения временного хода фактических и спрогнозированных значений среднесезонной температуры и малыми величинами ошибок ее прогноза.

### Заключение

В результате проведенной работы можно сделать общий вывод, что предложенный алгоритм, основанный на использовании двумерной динамико-стохастической модели и аппарата калмановской фильтрации, может быть с успехом применен для сверхдолгосрочного (с заблаговременностью 1 год) прогноза среднесезонной температуры в пограничном слое атмосферы.

В дальнейших наших исследованиях предполагается оценить возможности использования этого алгоритма в задачах сверхдолгосрочного прогнозирования влажности воздуха. Кроме того, наши усилия будут направлены также и на решение за-

дачи климатического прогноза температуры и влажности воздуха с заблаговременностью от 2 до 5 лет.

1. Комаров В.С., Попов Ю.Б., Суворов С.С., Кураков В.А. Динамико-стохастические методы и их применение в прикладной метеорологии. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2004. 236 с.
2. Шерстюков Б.Г. Региональные и сезонные закономерности изменений современного климата. Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2008. 247 с.
3. Переведенцев Ю.П. Теория климата. Казань: Казан. ун-т, 2009. 504 с.
4. Лавриненко А.В., Комаров В.С., Попов Ю.Б. Методика сверхкраткосрочного прогноза параметров состояния атмосферы на основе алгоритма калмановской фильтрации и двумерной динамико-стохастической модели // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 4. С. 344–348.
5. Ивахненко А.Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. Киев: Техника, 1975. 311 с.
6. Сейдж Э.П., Мэлса Дж.Л. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. М.: Связь, 1976. 496 с.
7. Лавриненко А.В. Исследование динамико-стохастического алгоритма сверхкраткосрочного прогноза метеорологических полей // Оптика атмосфер. и океана. 2006. Т. 19, № 10. С. 919–921.
8. Комаров В.С., Ломакина Н.Я., Лавриненко А.В., Ильин С.Н. Изменения климатов пограничного слоя атмосферы Сибири в период глобального потепления. Часть 1. Аномалии и тренды температуры воздуха // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 11. С. 942–950.

#### *V.S. Komarov, A.V. Lavrinenko, S.N. Ilyin. Superlong-term dynamic-stochastic forecast of the air temperature in the boundary atmospheric layer.*

A possibility of the use of two-dimensional dynamic-stochastic model for the superlong-term forecast of the air temperature in the atmospheric boundary layer for the one year lead time is considered. The estimation of the quality of the forecast is done for long-term (from 1973 to 2010) average annual and average seasonal (winter and summer) air temperature observations for 6 stations of Siberian region: Dickson, Tiksi, Salekhard, Omsk, Chita, Yakutsk.