

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СРЕДНЕМЕСЯЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И МЕСЯЧНЫХ СУММ ОСАДКОВ НА ТЕРРИТОРИИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ С ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТЬЮ ДО ОДНОГО ГОДА

Н.Н. Завалишин, А.В. Игнатов, Е.Г. Бочкарева, Н.В. Пальчикова

*ФГБУ «Сибирский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт», Новосибирск*

Проверено множество гипотез о стохастических зависимостях среднемесячной приземной температуры воздуха и месячных сумм осадков текущего года на метеостанциях Западной Сибири от предыдущих совместных значений этих же характеристик и параметров, индицирующих факторы внешнего воздействия на Землю из космоса. По отдельности проанализированы низкочастотная и высокочастотная составляющие межгодовой изменчивости рассматриваемых метеорологических переменных. Построены модели их совместной изменчивости. Статистически значимые свойства, которые можно использовать при составлении долгосрочного метеорологического прогноза, подтверждены только в поведении низкочастотных составляющих изменчивости более агрегированных в пространстве и времени характеристик температуры и осадков по сравнению с их ежемесячными показателями на отдельных станциях. Для высокочастотных компонент отмечена слабость их связей с рассматриваемыми в работе предикторами.

Ключевые слова: прогноз, температура, осадки, месяц, Западная Сибирь.

ANALYSIS OF THE POSSIBILITIES OF FORECASTING THE AVERAGE MONTHLY AIR TEMPERATURE AND MONTHLY PRECIPITATION AMOUNTS ON THE TERRITORY OF WESTERN SIBERIA WITH A LEAD TIME OF UP TO ONE YEAR

N.N. Zavalishin, A.V. Ignatov, E.G. Bochkaryova, N.V. Palchikova

Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute, Novosibirsk

Many hypotheses on stochastic dependences between monthly average surface air temperature and monthly precipitation amounts observed at meteorological stations in Western Siberia in the current year and previous joint values of the same characteristics and parameters indicating factors of external influence on the Earth

from space have been tested. The low-frequency and high-frequency components of the interannual variability of the considered meteorological variables are analyzed separately. Models of their joint variability are built. Statistically significant properties that can be used in long-term meteorological forecasting are confirmed only in the behavior of low-frequency components of variability of more aggregated in space and time characteristics of temperature and precipitation as compared with their monthly indicators at individual stations. For high-frequency components, the weakness of their connections with the predictors considered in the study is noted.

Key words: *forecast, temperature, precipitation, month, Western Siberia.*

Введение

Проблема качества долгосрочных метеорологических прогнозов (ДМП), то есть прогнозов с заблаговременностью от месяца до двух лет, касается многих отраслей экономики: сельского хозяйства, энергетики, транспорта, строительства и др. Успешность таких прогнозов для этих отраслей может заметно повысить их экономическую эффективность. Обычно в задачах долгосрочного метеорологического прогнозирования оценивают некоторые усредненные по пространству и времени характеристики температуры воздуха и количества осадков. Успешность подобных прогнозов по совокупности используемых критериев можно в среднем характеризовать так: из трех долгосрочных прогнозов оправдываются два. Более детально о формах представления ДМП и критериях их качества можно ознакомиться в статье [1].

Несмотря на заметное развитие в последнее время технологий прогнозирования, основанных в первую очередь на моделировании динамических процессов в атмосфере [2–4], позволившем заметно продвинуться в улучшении прогнозов погоды, существенно повысить точность ДМП пока не удастся. Поэтому на фоне накопления новых данных о моделируемой системе развиваются и уточняются динамические модели, включающие в себя и океанические процессы, формируются ансамбли прогнозов, а также проводятся различные статистические исследования, ориентированные на выявление каких-либо не учитываемых ранее, но существенных для уточнения ДМП закономерностей динамики атмосферы. Настоящую работу, в которой на конкретных данных проверяется ряд гипотез о закономерностях межгодовой изменчивости температуры и осадков на территории Западной Сибири, скорее всего, следует отнести к статистическим исследованиям. Но, с другой стороны, использование специальной компьютерной технологии [5], позволяющей строить различные, в том числе и весьма сложные, стохастические модели связей прогнозируемых характеристик между собой и с их возможными физическими предикторами, дает возможность рассматривать ее и как одно из

направлений развития физико-статистических моделей, предназначенных для составления ДМП. Работа является естественным продолжением предыдущих исследований авторов [6–8], касающихся задач долгосрочного прогнозирования гидрометеорологических характеристик. В частности, авторы ориентируются на достигнутые показатели качества ДМП за период 2013–2022 гг., равные $\rho = 0,14$; $\Delta T = 56,4$; $P_R = 59,7$ в месячном решении по Западной Сибири.

Использованные материалы и методы

В группу выбранных для прогнозирования переменных в нашем случае включены заданные средними месячными значениями температуры воздуха и суммы осадков на различных метеостанциях, расположенных на территории Западной Сибири. В перечень этих метеостанций вошли 30 пунктов наблюдений за температурой и 31 пункт наблюдения за осадками. Предшествующие периоду, на который составляется прогноз, значения этих же переменных рассматриваются в качестве значений возможных предикторов для каждой прогнозируемой характеристики. Также в качестве возможных предикторов в список используемых переменных добавлены параметры, отражающие изменчивость внешнего гравитационного, электромагнитного и корпускулярного воздействий на Землю. Основанием для этого является предположение, что межгодовая изменчивость прогнозируемых характеристик частично формируется под воздействием названных факторов. В качестве индикаторов интенсивности их воздействия были выбраны характеристики, определяющие положение в пространстве Луны, четырех планет солнечной системы (Венера, Марс, Юпитер, Сатурн), а также числа Вольфа.

Для решения задачи первоначально был сформирован массив ретроспективных данных об оценках месячных значений выбранных для прогнозирования переменных и их возможных предикторов с годовым шагом по времени. При такой структуризации используемых сведений одни и те же физические параметры в разные месяцы года рассматриваются как значения 12 различных характеристик, называемых далее месячными переменными. Сезонная изменчивость физических переменных в каждом отдельном ряду таких характеристик отсутствует. Остается только межгодовая изменчивость, закономерности которой как раз и необходимо выявить, чтобы попытаться решить поставленную задачу. Таким образом, полное число месячных метеорологических переменных в исходных данных составило 732 наименования, а число дополнительных месячных предикторов, которые предположительно могут индицировать воздействие на метеорологические процессы космических факторов, составило 276 наименований.

Большая часть сведений о значениях перечисленных выше характеристик была взята из баз данных системы «Кассандра-Сибирь» [9]. Другая часть материалов о значениях предикторов была получена из открытых источников в интернете. Все временные ряды использованных в работе переменных заканчивались 2021 г. Начальные значения метеорологических рядов имели разную привязку по времени, но относились не ранее чем к 1883 г. Под контрольную выборку, в зависимости от решаемой задачи, отводилось то или иное количество реализаций, относящееся к правой части сформированных временных рядов.

В качестве основного инструмента, с использованием которого осуществлялся поиск прогностических зависимостей, применялась программа «Стохастическое моделирование» [10, 11]. Эта программа является достаточно мощным средством помощи пользователю при математической формулировке и статистической проверке предположений о неизвестной зависимости прогнозируемых переменных от их предикторов. Такие предположения о возможном характере этой зависимости являются дополнительными гипотетическими данными, которые используются при построении прогностических моделей. Программа «Стохастическое моделирование» также включает в себя модули, предназначенные для построения совместной изменчивости переменных, для расчета и представления искомых прогностических оценок в точечной, интервальной или вероятностной форме.

Предварительный контроль и корректировка исходных данных

Одной из особенностей задач долгосрочного метеорологического прогнозирования является слабость зависимостей предсказываемых характеристик от их предикторов. Поэтому, если такие предикторы априори неизвестны, их поиск является наиболее трудоемкой частью процедуры построения необходимых для решения этих задач моделей. При использовании реальных данных результаты такого поиска часто статистически неустойчивы. Большое значение для повышения их устойчивости имеет исключение существенных ошибок (сбоев) из исходных данных. В связи с этим перед началом исследования весьма полезно осуществить поиск подозрительных на сбой значений переменных. Простейшим приемом такого поиска является нахождение статистически аномальных выбросов в используемых данных. Его выполнение можно считать финальным этапом подготовки к решению задачи или первым этапом ее выполнения. В нашем случае для реализации этого приема по оценкам значений каждой из переменных были построены гистограммы их распределений. Выделение аномалий производилось путем сравнения отдельных значений пе-

ременных с параметрами соответствующих гистограмм. Эта работа выполняется программой «Стохастическое моделирование» при загрузке исходных данных из файлов, расположенных на внешних носителях информации, в оперативную память компьютера.

Число выявленных аномальных значений составило: при использовании всей выборки (1883–2021) – 20 выбросов; при использовании сокращенной выборки (1949–2021) – 9 выбросов. После обращения к первоисточникам явно ошибочные аномальные оценки были заменены на правильные значения переменных или исключены из исходных данных. К оставшимся не вызывающим сомнения экстремальным оценкам значений двойственное отношение. С одной стороны, они содержат информацию о редких событиях, что позволяет лучше понимать и, соответственно, моделировать физические механизмы формирования изменчивости значений прогнозируемых характеристик. С другой стороны, наличие таких аномалий усложняет применение статистических методов исследования взаимосвязей между переменными, которое выполняется при поиске необходимых для построения моделей взаимосвязей. В итоге было принято компромиссное решение – для использования в дальнейшей работе мы оставили только выборку данных на отрезке времени с 1949 по 2021 г.

Результаты исследования

Проверка наличия трендов в рядах температуры воздуха и осадков. Рассмотрим сначала самый простой подход к решению задач долгосрочного прогноза рассматриваемых метеорологических переменных. Этот подход основывается на построении и экстраполяции трендов. Такие тренды в рядах средней месячной температуры и суммы осадков на отдельных метеостанциях выявляются. Однако объясняемая их моделями доля изменчивости мала и составляет в использованных данных (даже для температурных рядов, в которых тренды более выражены) не более нескольких процентов от общей межгодовой изменчивости этих переменных.

Пытаясь изменить соотношение низкочастотной и высокочастотной долей изменчивости в анализируемых временных рядах, мы перешли к новым характеристикам, агрегируя несколькими способами первичные данные. При их агрегировании по времени осуществлялся переход от месячных к годовым значениям переменных. При агрегировании по пространству проводилось усреднение месячных данных по всем станциям. Для температуры дополнительно формировались новые переменные, значения которых рассчитывались как линейные комбинации средних температур одного и того же месяца на отдельных станциях. Коэффициенты в таких линейных комбинациях определялись с учетом взаимной корреляции этих переменных. При наивысшей степени агрегирования

годовые характеристики температуры и осадков дополнительно усреднялись по всем станциям. В результате всех примененных способов было сформировано 92 новых переменных, для которых также были построены трендовые модели.

Анализ этих моделей показал, что выполненное агрегирование данных, действительно, улучшает соотношение «сигнал/шум» в прогностических методиках, основывающихся на экстраполяции на очередной год вперед низкочастотной составляющей изменчивости температуры и осадков. При проверке на контрольной выборке (2019–2021) предсказательная способность моделей трендов для агрегированных только по пространству месячных переменных возрастает (по сравнению с прогнозом по среднему значению обучающей выборки) примерно в два раза, для годовых значений – в 4–5 раз, а для годовых значений, усредненных по всем станциям, – в 6–8 раз.

При использовании оценок трендов в качестве прогностических моделей были применены три способа их построения: глобальная линейная аппроксимация всего ряда (ГЛА), локальная кусочно-линейная аппроксимация (ЛЛА) и локальная линейная экстраполяция (ЛЛЭ). В первом случае в качестве тренда подбирается единая линейная функция времени, которая минимизирует остаточную дисперсию на всей обучающей выборке. Во втором случае, начиная с конца обучающей выборки, формируется его кусочно-линейная аппроксимация ряда путем его разбиения на серии лет повышения или понижения локального линейного тренда. Длина серии подбирается в диапазоне от 6 до 30 лет по условию минимизации остаточной дисперсии на каждом линейном участке тренда. В третьем случае определяется масштаб скользящего сглаживания ряда таким образом, чтобы при линейной экстраполяции его локального сглаженного среднего в ближайшую по времени точку модельное предсказание наилучшим образом аппроксимировало каждое соответствующее независимое фактическое значение. Наилучшие прогностические результаты, в среднем по всем вариантам агрегированных переменных, показали модели трендов, построенные по методу ЛЛЭ.

Проверка наличия циклических колебаний в рядах отклонений агрегированных переменных от их трендов. Второй сравнительно простой прием поиска возможных прогностических закономерностей в отдельных временных рядах – это анализ этих рядов на предмет скрытой цикличности, аппроксимирующей более высокочастотную часть их межгодовой изменчивости. Для проверки этой гипотезы мы исключили тренды из рядов агрегированных характеристик и в полученных рядах отклонений с использованием нескольких различных алгоритмов попытались выявить устойчивые или затухающие после внешнего воздействия циклические процессы. Наличие таких циклов совместно с трендами позволило бы

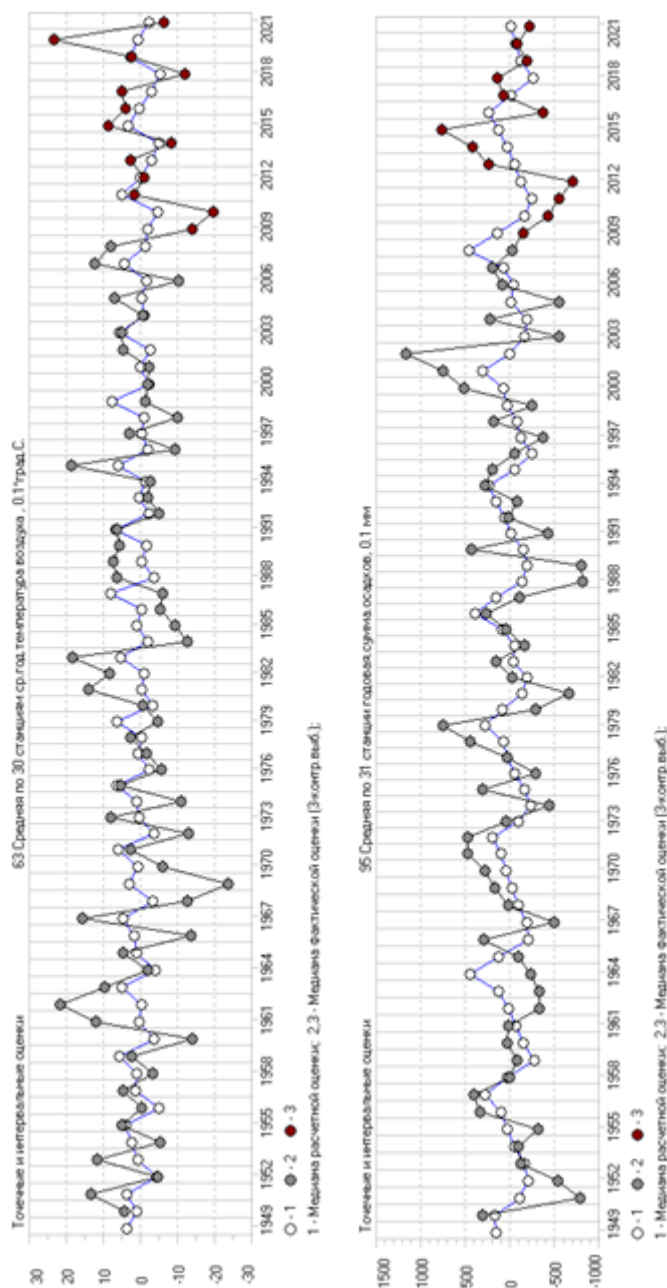


Рис. 1. Аппроксимация циклическими функциями, построенными с использованием только обучающей выборки, рядов отклонений от трендов для осредненных по всем станциям годовых характеристик температур и осадков

улучшить прогностическую экстраполяцию рассматриваемых метеорологических переменных. Увы, но каких-либо статистически значимых колебательных эффектов, пригодных для уточнения прогнозов межгодовой изменчивости исследуемых метеорологических характеристик, обнаружено не было. Примеры аппроксимации и прогнозирования рядов отклонений от наиболее агрегированных переменных с помощью моделей циклических функций приведены на рис. 1.

Модели многофакторных прогностических зависимостей для месячных характеристик температуры и осадков на отдельных метеостанциях. Рассмотрим теперь более сложные и громоздкие подходы к поиску прогностических моделей. Вернемся к исходным метеорологическим переменным и будем строить для каждой из них многофакторную модель зависимости от начальных условий и текущих внешних факторов. В качестве начальных условий используем значения всех контролируемых в нашей задаче метеорологических и космических характеристик в предыдущие три года перед годом, для которого составляется долгосрочный прогноз. В качестве параметров, задающих воздействие текущих факторов, выберем значения космических характеристик, относящиеся к тому же временному интервалу, что и значение прогнозируемой характеристики. Значения таких параметров, индицирующих воздействие космических факторов, в силу свойств их временной изменчивости, могут быть с достаточной точностью рассчитаны с помощью программы «Стохастическое моделирование» или любой другой подходящей технологии и использованы при составлении прогноза температуры и осадков.

При формулировке задачи для всех 732 метеорологических переменных на основе указанных выше начальных условий и факторов внешнего воздействия зададим множество возможных предикторов, и далее для каждой из них будем искать ограниченную по длине комбинацию рекомендуемых предикторов, обеспечивающую наивысшую ожидаемую точность прогноза с требуемой заблаговременностью. Программа «Стохастическое моделирование» допускает такую постановку задачи. Ее решение (за исключением формулировки самой постановки) не предполагает непосредственного участия эксперта, но, с учетом большого числа прогнозируемых переменных и еще большего числа их предполагаемых предикторов, требует относительно больших затрат компьютерного времени. Тем не менее попытка решения задачи в такой ее постановке была сделана, однако она не увенчалась успехом. Построенные с использованием двух разных алгоритмов выбора предикторов многофакторные модели не подтвердили (табл. 1) на контрольных данных сохранение полученного на обучающей выборке решения.

Неустойчивость результата моделирования, в процессе которого для прогнозируемых переменных производится выбор включаемых в модель

Таблица 1

**Усредненные по всем 732 переменным оценки параметров качества
прогностических моделей, построенных с применением
двух разных алгоритмов выбора предикторов**

Обучающая выборка (60 совместных реализаций)			Контрольная выборка (13 совместных реализаций)				
M1	M2	M3	M3к	Sф/Sp	Sф/So	Sф/Sн	Δ
0,04	0,88	0,281	0	1,62	1,34	1,16	0,44
<0,78	0,89	0,34	0	1,6	1,3	1,12	0,45

Обозначения. M1 и M2 – оценки мер доверия, соответственно, к аргументам и оператору регрессии, M3 – оценка меры точности аппроксимации. Все эти три меры определяются в процессе построения модели с подбором предикторов для зависимой переменной. So – стандартное отклонение обучающей выборки; Sф, Sp и Sн – средне-квадратичные отклонения, соответственно, фактической ошибки прогноза, расчетной ожидаемой ошибки прогноза и ошибки прогноза по «норме», т. е. экстраполяции среднего значения обучающей выборки. M3к – мера точности аппроксимации контрольной выборки; Δ – доля прогнозов, оправдавшихся по условию $Sф < 0,67So$.

предикторов из нескольких тысяч возможных претендентов на эту роль при слабости искомым зависимостей, скорее всего, связана со случайностью в выборе их рекомендуемой комбинации. При прямом подборе предикторов из их исходного списка при проверке множества гипотетических комбинаций (алгоритм 1) средняя вероятность правильного выбора оценивается величиной $M1 = 0,04$. При использовании алгоритма 2, в рамках которого выполняются различные операции по повышению этой вероятности, определяется ее верхняя оценка $M1 < 0,78$, но и этот алгоритм не гарантирует правильности выбора предикторов. В такой ситуации для большинства функций на ограниченной обучающей выборке данных подбиаются комбинации ложных аргументов, зависимость от которых статистически выглядит более сильной, чем от истинных предикторов прогнозируемых переменных. В результате этого построенные оптимальные по заданному критерию модели не проходят проверку на контрольной выборке.

Если истинная зависимость не очень сильная, но все-таки сильнее большинства ложных вариантов, полезные модели, обладающие предсказательной способностью, могут быть найдены. В пользу этого утверждения можно привести примеры моделей связей между суммами осадков, относящихся к одному и тому же месяцу. Предикторы в таких моделях, при их подборе по алгоритму 2, устойчиво выявляются в рамках примерно такой же постановки задачи их поиска, что и в нашем случае. Предсказательная способность двух таких моделей, отражающих пространственные взаимосвязи между текущими осадками, показана на рис. 2.

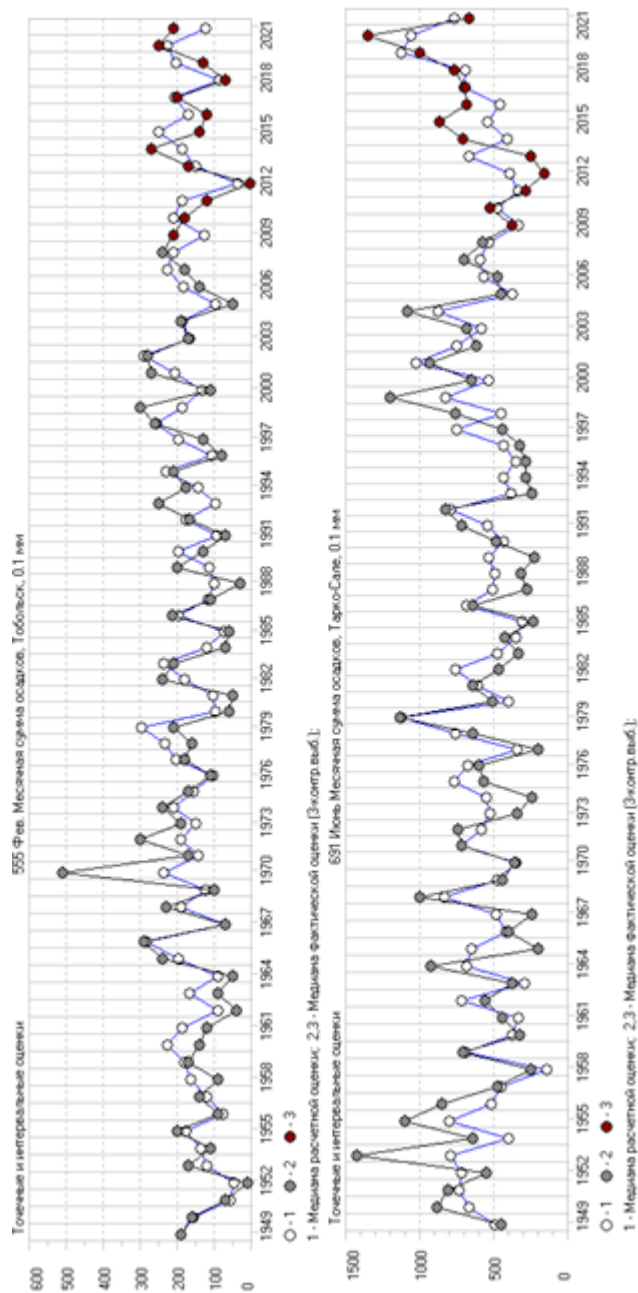


Рис. 2. Примеры выявления и использования для контрольного расчета не очень сильных, но устойчивых во времени связей между месячными суммами осадков

Модели совместной изменчивости температуры и осадков. Вернемся снова к агрегированным метеорологическим характеристикам и попытаемся построить модель их совместной изменчивости. В рамках такой более сложной модели объединяются в систему множество частных (или элементарных) моделей зависимости от предикторов и взаимозависимости между прогнозируемыми характеристиками.

При составлении прогноза по модели совместной изменчивости сначала по известным значениям предикторов вычисляются предварительные прогностические оценки метеорологических переменных. Далее эти оценки используются в качестве приближенно заданных аргументов в моделях взаимосвязи их текущих значений, что позволяет получить вторичные оценки значений прогнозируемых переменных. Наконец, две названные оценки каждой переменной согласуются между собой с учетом их расчетных параметров качества. За счет операции взвешенного усреднения, выполняемого при таком согласовании, точность окончательных оценок прогнозируемых значений переменных может быть повышена. Однако нужно заметить, что из-за существенной погрешности (систематической или случайной) задания предикторов в моделях взаимосвязи между прогнозируемыми характеристиками, математической структуры описываемых ими регрессий и частичной взаимозависимости предварительной и вторичной оценок такое уточнение реализуется не всегда и не для каждой переменной.

Сформируем по описанному алгоритму модель совместной изменчивости и рассчитаем прогностические оценки для агрегированных температур и осадков. При получении первичных оценок используем набор частных моделей трендов, построенных с использованием алгоритма ЛЛЭ. Для расчета вторичных оценок построим модели наиболее сильных взаимосвязей между значениями этих переменных, относящимися к одному и тому же году. Окончательные результаты проверим на контрольной выборке, под которую в данном варианте задачи выделим три года (2019–2021). Параметры, характеризующие ожидаемую и фактическую точность контрольных расчетов, приведены в табл. 2. В первой строке этой таблицы помещены значения параметров качества прогноза, построенного только на основе трендовых ЛЛЭ моделей, во второй строке – аналогичные параметры для модели совместной изменчивости.

Сравнение этих двух строк показывает, что принципиального улучшения прогноза метеорологических характеристик за счет дополнительного учета взаимосвязей между их текущими значениями получить не удалось. По одним критериям качество совместного прогноза оказывается выше, по другим – ниже.

Если построить модель совместной изменчивости и для исходных переменных, т. е. для средних месячных температур и месячных сумм

Таблица 2

**Оценки параметров качества прогноза,
составленного с использованием модели совместной изменчивости
94 агрегированных метеорологических переменных**

Модели, использованные для прогнозирования температу- ры и осадков	t	Sф/Sп	Sф/So	Sф/Sн	Δ	ρ
Тренды (модели ЛЛЭ)	-0,11	1,03	1,02	0,77	0,49	0,21
Модель совместной изменчивости	-0,17	1,37	1,00	0,76	0,51	0,31

Обозначения. t – критерий Стьюдента, характеризующий среднее смещение прогнозов относительно фактических значений; ρ – критерий, характеризующий корреляцию знаков отклонений фактических и прогнозных значений от локальной климатической нормы; остальные обозначение – такие же, что и в табл. 1.

осадков на отдельных станциях, то можно увидеть, что среднее качество прогнозов в этом случае еще меньше и является недостаточным для их практического использования.

Попытка прогнозирования месячных значений температуры и осадков на очередной месяц вперед по моделям их зависимости от внутригодовых значений предикторов. Как показало описанное выше исследование, на основе использованных данных и примененных методов не удастся с заданной заблаговременностью и пространственно-временным разрешением построить модели, позволяющие формировать прогнозы температуры и осадков с практически приемлемой точностью. Достаточно устойчиво и статистически значимо на исследованном временном интервале выделяется только трендовая составляющая изменчивости, причем не для первоначально выбранных месячных метеорологических переменных, а для их более агрегированных по пространству и времени аналогов.

Возможно, на основе тех же самых данных можно строить практически полезные по точности прогнозы рассматриваемых характеристик температуры и осадков с меньшей заблаговременностью? Для проверки этого предположения попытаемся найти в исходных материалах свойства, позволяющие прогнозировать интересующие нас переменные на очередной месяц. При формулировке задачи по поиску таких свойств выберем пробную группу, включающую в себя 70 месячных метеорологических характеристик, относящихся к теплomu сезону года, контролируемых на пяти метеостанциях, расположенных в разных районах Западной Сибири. В качестве значений возможных предикторов для этой группы прогнозируемых переменных назовем значения всех используемых характеристик (метеорологических и космических), имевшие место в предыдущие три месяца по отношению к месяцу, на который составляется прогноз. Далее,

Таблица 3

**Оценки параметров качества моделей прогноза
на очередной месяц вперед на примере 70 месячных переменных,
относящихся к теплоту (апрель–октябрь) времени года**

t	M3	Sф/Sp	Sф/So	Sф/Sн	Δ	ρ
0,23	0,14	1,32	1,21	1,1	0,44	0,02

Обозначения такие же, как и в табл. 1 и 2.

на выборке данных за 1949–2008 гг. для каждой из 70 зависимых переменных найдем оптимальную комбинацию рекомендуемых предикторов, построим модели зависимости от них и выполним контрольный прогноз, который проверим на данных за 2009–2021 гг. Ряд параметров, характеризующих результаты этой работы, представлены в табл. 3.

По данным, приведенным в табл. 3, можно судить, что возможные зависимости месячных метеорологических характеристик от запаздывающих на 1–3 месяца предикторов такие же слабые, как и в моделях, ориентированных на прогнозы этих же переменных с большей заблаговременностью. Эти зависимости также устойчиво не выявляются использованными средствами на фоне шумового сигнала. Средний уровень точности аппроксимации обучающей выборки для рассматриваемой группы переменных ($M3 = 0,14$) находится в области флуктуаций этой характеристики, поэтому и выбираемые по статистическим критериям комбинации предикторов для зависимых переменных в большинстве моделей также случайны. По этой причине качество моделей на контрольной выборке не подтверждается и не превышает качества прогноза по локальной норме.

Поиск зависимостей от космических факторов на данных, сформированных в ряды с месячным шагом по времени. Главная физическая гипотеза, использованная в настоящей работе, это предположение о влиянии космических факторов на межгодовую изменчивость температуры и осадков на территории Западной Сибири. Чтобы с большей уверенностью убедиться в наличии или отсутствии такой зависимости, рассмотрим еще одну задачу. При ее подготовке сначала сформируем исходные данные в виде таблицы, в которой значения всех переменных задаются с месячным шагом по времени. В этом случае число контролируемых в задаче характеристик сокращается в 12 раз (с 1008 до 84), а число совместных реализаций переменных увеличивается, соответственно, в это же число раз. Затем исключим из их временных рядов тренд и среднесезонную волну сезонной изменчивости. Эта операция повышает значение отношения искомой, возможно объясняемой космическими факторами, дисперсии к дисперсии суммарной изменчивости этих рядов, что несколько увеличивает чувствительность используемых нами методов поиска

скрытых в данных зависимостей метеорологических переменных от их потенциальных космических предикторов. Далее, для значений рядов отклонений от тренда и среднего сезонного хода для пробной группы семи метеорологических переменных, выбранных случайным образом из всего их списка, проверим гипотезу о возможной зависимости этих семи переменных от предикторов, индицирующих влияние космических факторов.

Поиск оптимальных моделей при описанных выше условиях показал, что, к сожалению, и в этой задаче каких-либо статистически значимых зависимостей для выбранной группы месячных метеорологических переменных от множества использованных космических предикторов обнаружено не было. Случайные связи при обучении моделей на достаточно большой выборке (840 совместных реализаций) эффективно подавлялись, так что даже не было необходимости проверять основанные на них модели на контрольной выборке. Статистическая значимость выводов о наличии или отсутствии такой зависимости в этом случае значительно выше, чем при анализе материалов, заданных с годовым шагом по времени, так как пробные гипотезы проверяются на существенно большем (в 12 раз) числе совместных реализаций, а само количество проверяемых гипотез много меньше. Однако если в разные месяцы года влияние на метеорологические характеристики космических факторов (солнечной активности и гравитации Луны и планет) реализуется по-разному, то данное обстоятельство может в определенной мере маскировать фактически имеющийся эффект такого воздействия. Чтобы попытаться уменьшить такой возможный маскирующий эффект различного проявления космических воздействий в разные сезоны года, в список возможных предикторов добавлялся номер месяца, но и это действие не привело к улучшению результата моделирования.

Заключение

В целях поиска или уточнения методик долгосрочного метеорологического прогноза с использованием многолетних данных о приземной температуре воздуха и суммах осадков на территории Западной Сибири и специализированного программного продукта проверено множество гипотез о возможных закономерностях формирования межгодовой изменчивости этих характеристик. Необходимые для прогноза модели искали в форме стохастических зависимостей среднемесячной приземной температуры воздуха и месячных сумм осадков текущего года на 31 метеостанции от совместных значений этих же переменных в предыдущие несколько лет, а также от параметров, индицирующих изменения электромагнитного, корпускулярного и гравитационного воздействия на Землю из космоса. Дополнительно было проведено аналогичное исследование изменчивости

для более агрегированных (в пространстве и времени) характеристик температуры и осадков. По отдельности анализировались низкочастотная и высокочастотная составляющие межгодовой изменчивости этих переменных. Также были сделаны попытки решения прогностической задачи путем построения модели совместной изменчивости названных метеорологических характеристик.

По итогам выполненной работы можно заключить, что статистически значимые свойства, которые можно использовать при разработке долгосрочного метеорологического прогноза, удалось обнаружить только в поведении низкочастотной составляющей более агрегированных (по сравнению с месячными значениями на отдельных станциях) характеристик температуры и осадков, что можно интерпретировать как изменение климата. Эти свойства лучше всего описываются моделями локальных трендов. Такие модели можно строить без использования каких-либо громоздких и требующих значительных компьютерных ресурсов алгоритмов. Модель простого линейного тренда рекомендуется строить на временном отрезке, начинающемся где-то в середине прошлого века и оканчивающемся моментом составления прогноза. Более сложные модели, для построения которых требуется применение специфических методов, например таких, как использованная в настоящей работе программа «Стохастическое моделирование», могут несколько улучшить прогностические результаты, но это улучшение минимально и статистически значимо не выделяется на фоне самых простых решений.

Попытка использовать более короткие внутригодовые взаимосвязи для предсказания месячной температуры и суммы осадков на очередной месяц по доступным к его началу данным тоже не привела к построению успешных прогностических моделей с такой заблаговременностью. Также не удалось обнаружить какой-либо заметной зависимости температуры и осадков от рассмотренных в работе космических факторов при компоновке данных, позволяющих делать статистически более значимые выводы.

Основной предполагаемой причиной полученного результата работы является слабость искомых прогностических зависимостей, закономерно ограничивающих высокочастотную часть межгодовой изменчивости рассматриваемых метеорологических переменных. Эта слабость не позволяет выявить истинные генетически обусловленные эффекты на фоне статистически более сильных, но случайных, наблюдающихся на ограниченной обучающей выборке формальных статистических связей между значениями предсказываемых переменных и значениями их ложных предикторов. При планировании дальнейшей работы представляется целесообразным попытаться с использованием инструментов программы «Стохастическое моделирование» отыскать конструктивные для составления ДМП по Сибири зависимости от характеристик океанических вод, состояния ледово-

го покрова и других параметров, которые будут рассматриваться в качестве потенциальных предикторов, как это делается и в динамических моделях общей циркуляции атмосферы.

Литература

1. Вильфанд Р.М., Зарипов Р.Б., Киктев Д.Б., Круглова Е.Н., Крыжов В.Н., Куликова И.А., Тищенко В.А., Толстых М.А., Хан В.М. Долгосрочные метеорологические прогнозы в Гидрометцентре России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 12–36.
2. Мирвис В.М., Мелешко В.П. Современное состояние и перспективы развития метеорологических прогнозов на месяц и сезон // Труды ГГО. 2008. Вып. 558. С. 3–40.
3. Толстых М.А. Глобальная полуагломерационная модель численного прогноза погоды. М.; Обнинск: ОАО ФОР, 2010. 111 с.
4. Толстых М.А., Желен Ж.Ф., Володин Е.М., Богословский Н.Н., Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Красюк Т.В., Кострыкин С.В., Мизяк В.Г., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Шляева А.В., Эзау И.Н., Юрова А.Ю. Разработка многомасштабной версии глобальной модели атмосферы ПЛАВ // Метеорология и гидрология. 2015. № 6. С. 25–35.
5. Игнатов А.В. Технология «Стохастическое моделирование»: основные положения и их реализация // Труды СибНИГМИ. 2021. Вып. 107. С. 20–29.
6. Завалишин Н.Н. Кусочно-стационарные модели динамики месячных сумм осадков и среднемесячных температур воздуха (Локально-климатическая модель): Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 1995. 16 с.
7. Игнатов А.В., Завалишин Н.Н. Закономерности и модели изменчивости полезного притока в озеро Байкал // География и природ. ресурсы. 2021. Т. 42, № 1. С. 56–64.
8. Завалишин Н.Н., Игнатов А.В., Бочкарева Е.Г., Пальчикова Н.В., Орлова З.С. Опыт долгосрочного прогнозирования гидроэлементов на территории Сибири и смежных регионов // Труды СибНИГМИ. 2021. Вып. 107. С. 43–58.
9. Завалишин Н.Н., Медведева Т.С., Орлова З.С. База данных технологии «Кас-сандра-Сибирь». Свидетельство о государственной регистрации в Реестре баз данных RU 2013620777. Дата регистрации в Реестре баз данных 02.07.2013.
10. Игнатов А.В. Стохастическое моделирование: Версия 02 «Поиск эмпирических закономерностей». Свидетельство о государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ № 2018660076. Дата регистрации в Реестре программ для ЭВМ 16.08.2018.
11. Игнатов А.В. Руководство пользователя программы «Стохастическое моделирование». Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2019. 217 с.