

Метеорология

Носкова Е.В., Обязов В.А., Вахнина И.Л.

20. Chugunkova, A.V., Pyzhev, A.I., Pyzheva, Ju.I. (2018), "Vlijanie global'nogo izmenenija klimata na jekonomiku lesnogo i sel'skogo hozjajstva: riski i vozmozhnosti", *Aktual'nye problemy jekonomiki i prava*, vol. 12, no. 3, pp. 523–537. doi: 10.21202/1993-047X.12.2018.3.523-537.

21. Shkljaev, V.A., Shkljaeva, L.S., Mandyt, D.T. (2010), "Osobennosti prostranstvennogo i sezonnogo izmenenija temperatury vozduha v Respublike Tyva", *Geograficheskij bulletin*, no. 1(12), pp. 68–77.

22. Shkljaev, V.A., Ermakova, L.N., Shkljaeva, L.S. (2012), "Osobennosti dolgovremennyh izmenenij harakteristik vegetacionnyh periodov v Permskom krae", *Geograficheskij bulletin*, no. 2(21), pp. 68–73.

23. Shul'gina, T.M., Bogomolov, V.Ju., Genina, E.Ju., Gordov, E.P. (2009), "Izuchenie povedenija temperatury na territorii Sibiri po dannym nabljudenij i reanaliza", *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'*, no. S17, pp. 275–279.

Поступила в редакцию: 17.03.2021

Сведения об авторах

About the authors

Елена Викторовна Носкова

канд. геогр. наук, младший научный сотрудник лаборатории географии и регионального природопользования, Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук;
672002, Россия, г. Чита, а/я 1032

Elena V. Noskova

Candidate of Geographical Sciences, Junior Researcher, Laboratory of Geography and Regional Nature Management, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences;
P.O. Box 1032, Chita, Russia, 672002

e-mail: elena-noskova-2011@mail.ru

Виктор Афанасьевич Обязов

доктор географ. наук, технический директор, ООО НПО «Гидротехпроект»;
199155, Россия, г. Санкт-Петербург, а/я 136

Victor A. Obyazov

Doctor of Geographic Sciences, Technical Director, NPO Gidrotekhproekt LLC,
P.O. Box 136, St. Petersburg, Russia, 199155

e-mail: obviaf@mail.ru

Ирина Леонидовна Вахнина

канд. биол. наук, научный сотрудник лаборатории географии и регионального природопользования, Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук;
672002, Россия, г. Чита, а/я 1032
Старший научный сотрудник Сибирской дендрохронологической лаборатории, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Irina L. Vahnina

Candidate of Biological Sciences, Researcher, Laboratory of Geography and Regional Nature Management, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences;
P.O. Box 1032, Chita, Russia, 672002
Senior Researcher, Siberian Dendrochronological Laboratory, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

e-mail: vahnina_il@mail.ru

Пробьса ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Носкова Е.В., Обязов В.А., Вахнина И.Л. Изменения приземной температуры воздуха на юге Сибири и их взаимосвязь с крупномасштабными циркуляционными процессами в атмосфере // Географический вестник = Geographical bulletin. 2021. № 2(57). С. 75–84. doi: 10.17072/2079-7877-2021-2-75-84.

Please cite this article in English as:

Noskova, E.V., Obyazov, V.A., Vahnina, I.L. (2021). Variations in the surface air temperature in the south of Siberia and their relationship with large-scale circulation processes in the atmosphere. *Geographical bulletin*. No. 2(57). Pp. 75–84. doi: 10.17072/2079-7877-2021-2-75-84.

УДК: 551.582.2

DOI: 10.17072/2079-7877-2021-2-84-95

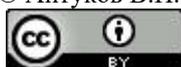
СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СРЕДНЕМЕСЯЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И МЕСЯЧНОЙ СУММЫ ОСАДКОВ В Г. ПЕРМИ

Валерий Нагимович Аптуков

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8048-3804>, Scopus Author ID: 6601983443, Author ID: 11997
e-mail: aptukov@psu.ru

Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия

© Аптуков В.Н., Митин В.Ю., 2021



Метеорология
Аптуков В.Н., Митин В.Ю.

Виктор Юрьевич МитинORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2406-3009>, Scopus Author ID: 55638430100, Author ID: 552293e-mail: victormitin@ya.ru*Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия*

В статье предложен подход к прогнозированию температуры и осадков на предстоящий месяц (сезон), базирующийся на изучении закономерностей влияния на них статистических характеристик температуры и осадков предшествующих периодов. К числу предикторов, наряду с базовыми статистическими характеристиками, относится индекс фрактальности – показатель хаотичности или детерминированности климатического ряда. В рамках данного подхода разработаны модели разного уровня для прогнозирования среднемесячной температуры и месячной суммы осадков. Описаны основные параметры данных моделей и указаны возможности их варьирования. Приведены примеры, иллюстрирующие методику прогнозирования с использованием различных типов моделей, включающие результаты проверки качества рассматриваемых моделей, расчет точности прогноза и зависимость точности прогноза от месяца (климатического сезона). Проверка моделей прогнозирования температуры и осадков на предстоящий месяц в 2020 году дала хорошие результаты: 9 верных прогнозов аномалий температуры из 10 (90%) и 7 верных прогнозов аномалий осадков из 9 (77.7%).

К л ю ч е в ы е с л о в а : климатические ряды, прогнозирование погоды, статистические методы, фрактальная размерность.

STATISTICAL MODELS FOR FORECASTING AVERAGE MONTHLY TEMPERATURE AND MONTHLY PRECIPITATION AMOUNT IN PERM

Valery N. AptukovORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8048-3804>, Scopus Author ID: 6601983443, Author ID: 11997e-mail: aptukov@psu.ru*Perm State University, Perm, Russia***Victor Yu. Mitin**ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2406-3009>, Scopus Author ID: 55638430100, Author ID: 552293e-mail: victormitin@ya.ru*Perm State University, Perm, Russia*

The article proposes an approach to forecasting mean temperature and total precipitation for the upcoming month, based on the study of the regularities of the influence of statistical characteristics of temperature and precipitation of previous periods on them. Among the predictors, along with the basic statistical characteristics, we use the fractality index which is an indicator of the randomness/ determinism of the climate series. Within the framework of this approach, we have developed models of different levels to predict the temperature and total precipitation amount in the upcoming month. The main parameters of these models are described and the possibilities of their variation are indicated. Examples are given to illustrate the forecasting methodology using various types of models and include the results of quality control of the models, calculation of forecast accuracy and dependence of forecast accuracy of average temperature and precipitation on the month (climate season). When tested in 2020, models for forecasting temperature and precipitation for the upcoming month give good results: 9 correct forecasts of temperature anomalies out of 10 (90%) and 7 correct forecasts of precipitation anomalies out of 9 (77.7%).

К e y w o r d s : climate series, weather forecasting, statistical methods, fractal dimension.

Введение

Прогнозирование погоды имеет важное значение, поскольку изменение основных климатических параметров оказывает существенное влияние на жизнедеятельность и здоровье человека и состояние окружающего мира. Достоверность прогнозов тем ниже, чем больше период времени прогноза, наиболее сложным является долгосрочное прогнозирование. Повышение точности долгосрочного прогнозирования на грядущий месяц и тем более климатический сезон в настоящее время является важной задачей.

В современном прогнозировании используются комбинации локальных и глобальных моделей, что обычно предполагает обработку большого объема данных с метеостанций с

*Метеорология**Антуков В.Н., Митин В.Ю.*

использованием суперкомпьютеров и требует значительных вычислительных и временных затрат. Возникает вопрос, с какой степенью достоверности возможно прогнозирование температуры и осадков на грядущий месяц (климатический сезон), обладая минимальной информацией и не используя больших вычислительных мощностей.

Существуют различные подходы к прогнозированию погоды [1]; для долгосрочного прогнозирования часто используются физико-статистические методы [2–6].

В данной статье представлена группа моделей прогнозирования температуры и осадков, основанных исключительно на идеях статистической обработки данных, с минимальной исходной информацией. В качестве предикторов используются значения средней температуры и осадков предшествующих периодов и их статистические характеристики.

Главная идея состоит в наличии некоторых статистических зависимостей прогнозируемых переменных от характеристик распределения температуры и осадков в предшествующие периоды.

Основной упор в предлагаемых моделях делается на прогноз, прежде всего, больших отклонений от средних значений (аномалий), поскольку именно они более интересны как для физических лиц, так и для организаций. Одной из главных целей прогнозирования является предсказание сильных погодных аномалий – различных природных катаклизмов.

Материалы и методы исследования

При построении статистических моделей прогнозирования температурного режима и осадков использовались данные среднесуточных температур и суточных сумм осадков с 1887 по 2018 г. (кроме 1921 г.), представленные в специализированных массивах, разработанных Всероссийским научно-исследовательским институтом гидрометеорологической информации [7]. Аналогичные данные за 2019–2020 гг. приведены на сайте [8].

Основными допущениями моделей долгосрочного прогноза температуры и осадков на следующий месяц (сезон) являются следующие положения.

1. На месячные (сезонные) значения температур и осадков в прогнозируемом периоде опосредованно влияет характер температурного режима и осадков предшествующих периодов, при этом важны не только средние величины, но и другие статистические характеристики этих рядов климатических параметров: среднеквадратичное отклонение, коэффициент асимметрии, индекс фрактальности (определяемый по методу минимального покрытия [9–10]).

2. Модели прогнозирования основаны на принципе повторяемости истории: считается, что направление аномалии климатических параметров в прогнозируемом периоде будет с большей вероятностью таким же, каким оно чаще всего было ранее в те годы, когда погодные характеристики предшествующих периодов (предикторы) были аналогичными.

3. Влияние совокупности предикторов может быть более значительным, чем воздействие каждого предиктора по отдельности.

4. Степень влияния различных совокупностей предикторов на прогнозируемую переменную может различаться. Наиболее выраженная зависимость предполагается в тех случаях, когда при повторениях аналогичных значений предикторов (климатических характеристик предшествующих периодов) в истории характер прогнозируемой переменной в интересующем периоде был в большинстве случаев одинаковым.

5. Для различных месяцев (климатических сезонов) наборы предикторов и характер статистических связей между ними и прогнозируемой переменной могут быть неодинаковыми.

Метеорология
Антуков В.Н., Митин В.Ю.

6. Климат обладает эффектом затухающей памяти, поэтому наиболее сильное влияние оказывают климатические параметры нескольких предыдущих месяцев. Глубина влияния, принятая в моделях, не превышает трех предыдущих месяцев.

Построение статистических моделей

Основной вариант статистических моделей прогнозирования аномалий температурного режима и осадков на следующий месяц строится следующим образом.

С помощью данных [7–8] определяются ряды различных климатических параметров $par(m)$ из ежегодных значений статистических параметров для рядов среднемесячных температур и месячных сумм осадков рядов в месяце с порядковым номером m за все время начиная с 1887 г. В качестве климатических параметров par используются следующие статистические функции для месячных рядов: среднее значение mt , среднее квадратичное отклонение dt , коэффициент асимметрии kt , индекс фрактальности μt . Аналогичные функции определяются для месячных рядов суточных сумм осадков: mo – среднее, do – среднее квадратичное отклонение, ko – коэффициент асимметрии, μo – индекс фрактальности. Например, ряд $mt(3)$ содержит среднемесячные значения температуры марта, начиная с 1887 г.

Для прогнозирования среднемесячной температуры $mt(m)$ или суммы осадков $mo(m)$ в месяце m используются наборы предикторов, составленные из климатических параметров трех предшествующих месяцев: $\{mt(m-3), mt(m-2), mt(m-1), mo(m-3), mo(m-2), mo(m-1), dt(m-3), dt(m-2), dt(m-1), do(m-3), do(m-2), do(m-1), kt(m-3), kt(m-2), kt(m-1), ko(m-3), ko(m-2), ko(m-1), \mu t(m-3), \mu t(m-2), \mu t(m-1), \mu o(m-3), \mu o(m-2), \mu o(m-1)\}$ – всего 24 параметра для каждого месяца. Случаи $m=0$, $m=-1$, $m=-2$ означают соответственно декабрь, ноябрь и октябрь прошлого года.

Среднее значение, среднее квадратичное отклонение и коэффициент асимметрии являются классическими статистическими характеристиками, но отдельное внимание необходимо уделить индексу фрактальности, поскольку использование фрактальных методов в метеорологии является относительно новым подходом. Примеры использования фрактальных методов встречаются в ряде публикаций, например [11–13]. Теоретические основы фрактального анализа изложены в [14–15].

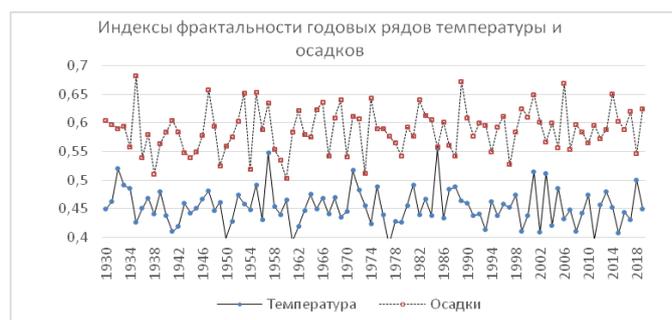


Рис. 1. Динамика изменения индекса фрактальности по годам
Fig. 1. The fractality index dynamics over the years

В частности, установлено, что индекс фрактальности температурных рядов обычно выше индекса фрактальности рядов осадков. На рис. 1 показана динамика индекса фрактальности годовых рядов среднесуточных температур и суточных сумм осадков за последние 90 лет.

Установлено также, что индексы фрактальности месячных рядов температуры и осадков в холодное время года в среднем немного выше, чем в теплый период.

Индекс фрактальности представляет собой разность между топологической и фрактальной размерностями и характеризует степень изрезанности временного ряда, а также является своеобразной мерой его хаотичности. Антиперсистентные ряды имеют высокий

Ранее, в статье [16], были рассчитаны характерные значения индекса фрактальности для рядов различных климатических параметров в различных городах России и мира. В статье [17] более подробно изучены закономерности, связанные с фрактальными свойствами рядов климатических параметров, в том числе рассмотрен вопрос о корреляции между индексами фрактальности различных климатических параметров. В

Метеорология

Антуков В.Н., Митин В.Ю.

индекс фрактальности, близкий к 1, для хаотичных рядов его значение приближается к 0,5, для трендоустойчивых рядов индекс фрактальности – около 0. Чем выше индекс фрактальности, тем более изрезанным является график временного ряда. Индекс фрактальности μ оценивается по формуле:

$$V_f(\delta) \equiv \sum_i A_i(\delta) \sim \delta^{-\mu(f)},$$

где $V_f(\delta)$ – полная амплитудная вариация, т.е. сумма локальных размахов $A_i(\delta)$ (разностей между локальным максимумом и минимумом на каждом отрезке разбиения) функции f разбиения с масштабом δ .

Зависимость $V_f(\delta)$ определяется для заданной последовательности разбиений путем использования линейной регрессии с помощью метода наименьших квадратов.

Аналогичные обозначения климатических параметров можно ввести для прогнозов на климатические сезоны, добавляя к обозначению климатического параметра букву «s», например, $smt(s)$ – средняя температура сезона s . Параметр s может принимать значения: $s=0$ – зима, $s=1$ – весна, $s=2$ – лето, $s=3$ – осень. Случаи $s < 0$ соответствуют сезонам предыдущего года.

Набором предикторов для прогнозирования аномалий температуры и осадков в климатических сезонах могут быть, например, те же 24 параметра для трех предыдущих месяцев или аналогичные параметры трех предыдущих сезонов: $\{smt(s-3), smt(s-2), smt(s-1), smo(s-3), smo(s-2), smo(s-1), sdt(s-3), sdt(s-2), sdt(s-1), sdo(s-3), sdo(s-2), sdo(s-1), smo(s-1), skt(s-3), skt(s-2), skt(s-1), sko(s-3), sko(s-2), sko(s-1), smt(s-3), smt(s-2), smt(s-1), smo(s-3), smo(s-2), smo(s-1)\}$. Заметим, что вопрос о взаимосвязи температуры и осадков разных климатических сезонов рассматривался в работах [18–19] (на примере Хабаровского края).

Все климатические параметры (предикторы и прогнозируемая переменная) ранжируются на основе определенной дискретной шкалы. В основном варианте моделей 40% самых низких значений каждого параметра соответствуют рангу $R=-1$ («отрицательная аномалия»), 40% самых высоких значений – рангу $R=1$ («положительная аномалия»), а 20% промежуточных значений – рангу $R=0$ («около нормы»). Таким образом, ранг R (par, y) параметра par для года y определяется формулой:

$$R(par, y) = \begin{cases} -1, par(y) < Q(par, 0.4) \\ 0, Q(par, 0.4) \leq par(y) \leq Q(par, 0.6) \\ 1, par(y) > Q(par, 0.6) \end{cases}$$

где $Q(par, q)$ – квантиль порядка q ряда произвольного климатического параметра par за все время начиная с 1887 г.

Более общий вид дискретной шкалы с тремя элементами может быть задан введением параметра q :

$$R(par, y) = \begin{cases} -1, par(y) < Q(par, q) \\ 0, Q(par, q) \leq par(y) \leq Q(par, 1 - q) \\ 1, par(y) > Q(par, 1 - q) \end{cases}$$

В частности, при $q=1/3$ получаем равномерную трехэлементную шкалу, при $q=0,5$ – равномерную двухэлементную шкалу с двумя градациями («выше нормы» и «ниже нормы»). В нашем случае применялся вариант с $q=0,4$.

Для прогнозирования не только направления, но и силы аномалии могут использоваться шкалы с большим количеством ранговых делений, например: равномерная четырехэлементная шкала с градациями «сильная отрицательная аномалия» ($R=-2$), «слабая отрицательная аномалия» ($R=-1$), «слабая положительная аномалия» ($R=1$), «сильная положительная аномалия» ($R=2$) – по 25% значений для каждого ранга или равномерная пятиэлементная шкала с градациями $R=-2, R=-1, R=0$ («около нормы»), $R=1, R=2$. В качестве примера в табл. 1 приведены значения рангов климатических параметров в 2019 г ($q=0,4$).

Из данных табл. 1 следует, что в 2019 г. были теплая зима и холодное лето, в осенние месяцы наблюдались значительные перепады, а в летние месяцы температура оказалась

Метеорология
Антуков В.Н., Митин В.Ю.

более стабильной по сравнению с другими годами; зимой и летом она была более хаотичной, т.е. отсутствовали продолжительные тренды похолодания или потепления; в большинстве месяцев она характеризовалась левосторонней асимметрией (т.е. периоды похолодания были относительно непродолжительными, но значительными). Особенностью рассматриваемого года являются также большие суммы выпавших осадков (в 9 месяцах из 12 – выше нормы), при этом распределение суммы осадков по месяцу, как правило, хаотичное и асимметричное. Таким образом, указанный набор параметров дает достаточно полную картину погоды.

Таблица 1

Ранги основных климатических параметров в 2019 г.
Ranks of the main climatic parameters in 2019

Месяц	Ранги							
	<i>mt</i>	<i>dt</i>	<i>kt</i>	<i>μt</i>	<i>mo</i>	<i>do</i>	<i>ko</i>	<i>μo</i>
<i>I</i>	2	3	4	5	6	7	8	9
Январь	1	-1	-1	1	1	0	-1	1
Февраль	1	0	-1	1	1	1	0	1
Март	1	-1	-1	1	1	1	-1	1
Апрель	0	-1	0	-1	-1	-1	-1	-1
Май	1	1	0	-1	1	1	-1	0
Июнь	-1	-1	1	1	0	0	-1	1
Июль	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1
Август	-1	0	-1	1	1	1	-1	0
Сентябрь	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
Октябрь	1	1	-1	-1	1	1	-1	1
Ноябрь	0	1	0	1	1	1	1	1
Декабрь	1	-1	-1	0	1	1	-1	0

Статистическая модель первого уровня для прогнозируемой переменной W и предикторов pr_1, \dots, pr_k строится следующим образом. Из диапазона истории I выбираются все годы, когда значения рангов всех предикторов совпадали с их значениями в текущем году. Определяется относительная частота каждого ранга прогнозируемой переменной при указанном условии, а наибольшая из относительных частот считается прогнозируемым значением.

Пусть, например, прогнозируется средняя температура марта 2019 г. через среднюю температуру января ($R=1$) и февраля ($R=1$). В диапазоне истории с 1887 по 2018 г. был 21 год с теплыми январем и февралем, когда одновременно выполнялись условия $R(mt(1))=1$ и $R(mt(2))=1$. Из них в шести случаях был холодный март $R(mt(3))=-1$, в двух случаях средняя температура марта находилась около нормы и в оставшихся тринадцати случаях была выше нормы. Максимальная относительная частота $13/21 \approx 0,619$ получена для варианта $R=1$, который принимается в качестве прогнозируемого рангового значения для температуры марта. Согласно данным табл. 1, этот прогноз в 2019 г. оказался верным.

Существенным недостатком таких моделей является невозможность учесть все важные предикторы, поскольку при увеличении числа предикторов k увеличивается количество вариантов комбинаций их рейтинговых значений, и для каждого такого варианта не набирается достаточное число случаев в диапазоне истории, который ограничен имеющимися данными и влиянием изменения климата. Таким образом, видим, что рассмотрение значений $k > 2$ является нецелесообразным. Можно исследовать однопараметрические модели ($k=1$), но оптимальным вариантом является случай $k=2$, при котором рассматривается влияние пары предикторов в совокупности. Параметрами моделей первого уровня являются диапазон истории I , ранговые шкалы климатических переменных R , прогнозируемая переменная и множество предикторов.

Метеорология
Антуков В.Н., Митин В.Ю.

Возможность рассмотрения большего количества предикторов реализуется в моделях второго уровня. При этом определяется некоторое множество, содержащее b предикторов (базис), в котором для каждой комбинации из k предикторов строится модель первого уровня. Общее количество таких моделей равно $C_b^k = \frac{b!}{k!(b-k)!}$, из них необходимо выбрать p лучших моделей, согласно заданному критерию качества предикторов. Цель предлагаемого критерия – выбор моделей с максимальными относительными частотами наиболее часто встречающегося рангового значения прогнозируемой переменной. Для данной совокупности моделей определяется итоговый прогноз по определенному алгоритму. Например, в качестве прогнозируемого значения ранговой переменной выбирается вариант с наибольшей средней относительной частотой по выбранным p моделям. Таким образом, предполагается, что наиболее статистически значимы те наборы переменных, для которых распределение относительных частот неравномерно. Полученное распределение относительных частот ранжированных значений прогнозируемой переменной можно считать ее вероятностным прогнозом, а вариант с наибольшей частотой – точечным прогнозом [20]. Вследствие неравномерности шкалы прогнозируемое значение практически всегда является аномальным: $R=1$ или $R=-1$.

В моделях второго уровня к числу параметров модели добавляются критерий качества предикторов, алгоритм итогового прогноза, количество отбираемых лучших моделей p .

Пусть, например, при составлении прогноза на март 2019 г. учитываются значения климатических параметров за январь и февраль 2019 г.: $mt(1)$, $mt(2)$, $mo(1)$, $mo(2)$, $dt(1)$, $dt(2)$, $do(1)$, $do(2)$, $kt(1)$, $kt(2)$, $ko(1)$, $ko(2)$, $\mu(1)$, $\mu(2)$, $\mu o(1)$, $\mu o(2)$ – всего 16 параметров. Из них можно составить 120 пар предикторов. Для каждой пары предикторов из истории (1887–2018) для статистической таблицы выбираются только те годы, в которые ранжированные значения всех переменных данной пары совпадали с их значениями в 2019 г. При $p=5$ прогноз осуществляется по пяти лучшим вариантам (табл. 2).

Таблица 2

Статистическая таблица для прогноза среднемесячной температуры на март 2019 г.
Statistical table for forecasting the average monthly temperature for March 2019

n/n	Переменные	$R[mt(3)]=-1$	$R[mt(3)]=0$	$R[mt(3)]=1$
1	dt(2), do(1)	1 (25%)	0 (0%)	3 (75%)
2	do(1), $\mu o(1)$	1 (14,3%)	1 (14,3%)	5 (71,4%)
3	kt(1), $\mu(1)$	12 (70,6%)	1 (5,9%)	4 (23,5%)
4	do(2), ko(2)	2 (20%)	1 (10%)	7 (70%)
5	ko(2), $\mu o(1)$	2 (20%)	1 (10%)	7 (70%)
Среднее	($p=5$)	30%	8%	62%

В табл. 2 жирным шрифтом выделено максимальное значение абсолютной и относительной частоты для каждой пары предикторов в столбце, соответствующем наиболее часто встречающемуся рангу прогнозируемой переменной. Согласно данным табл. 2, наиболее вероятное значение (62%) имеет вариант $R[mt(3)]=1$ (повышенный температурный фон), который является прогнозируемым значением. Данные статистики по пяти моделям с лучшими парами предикторов распределились в соотношении 1:4 в пользу прогноза $R=1$. Данный прогноз оказался верным: в марте 2019 г. среднемесячная температура воздуха в Перми составила минус 1,8°, что выше климатической нормы на 2,4°, при этом было всего три дня с существенной отрицательной аномалией.

Проверку моделей второго уровня можно осуществлять таким образом: с помощью данной модели прогнозировать среднемесячную температуру и месячную сумму осадков за последние 10 лет (2009–2018), для которых известны реальные данные, при этом диапазон истории ограничивается 2008 г. или годом,

Метеорология
Антуков В.Н., Митин В.Ю.

предшествующим году прогнозирования (т.е. рассматриваются модели с диапазонами истории 1887–2008, 1887–2009, ... , 1887–2018 для прогноза на 2009, 2010, ... , 2018 год соответственно).

Проверка выполняется путем сопоставления реальных и прогнозируемых данных с помощью определенного критерия качества модели, позволяющего определить точность модели. Предлагаемый критерий определяется следующим образом: прогноз считается верным, если реальное значение (Real) ранга климатического параметра не равно нулю и совпадает с прогнозируемым (Prog) и неверным, если реальное значение не равно нулю и не совпадает с прогнозируемым. Варианты с реальным значением прогнозируемого параметра, равным нулю, не рассматриваются, поскольку модель ориентирована именно на верное прогнозирование аномалий, что является наиболее важным. Этот критерий представлен в табл. 3.

Таблица 3

Критерий качества статистических моделей
Quality criterion for statistical models

<i>Prog / Real</i>	<i>-1</i>	<i>0</i>	<i>1</i>
<i>-1</i>	Верно	Не прогнозируем	Неверно
<i>0</i>	Неверно*	Не прогнозируем*	Неверно*
<i>1</i>	Неверно	Не прогнозируем	Верно

Таблица 4

Точность прогнозов температуры за 2009–2018 гг.
Accuracy of temperature forecasts for 2009–2018

<i>Температура</i>	<i>Точность прогнозов температуры</i>	
	<i>p=5</i>	<i>p=15</i>
Месяц		
Март	6/9 (66,7%)	6/9 (66,7%)
Апрель	7/8 (87,5%)	7/8 (87,5%)
Май	7/9 (77,8%)	8/9 (88,9%)
Июнь	3/8 (37,5%)	4/8 (40%)
Июль	5/9 (55,5%)	4/9 (44,4%)
Август	5/9 (55,5%)	6/9 (66,7%)
Сентябрь	5/8 (62,5%)	5/8 (62,5%)
Октябрь	4/8 (50%)	4/8 (50%)
Ноябрь	6/8 (75%)	7/8 (87,5%)
Декабрь	8/10 (80%)	10/10 (100%)
Итого	56/86 (65,1%)	61/86 (70,9%)

Таблица 5

Точность прогнозов осадков за 2009–2018 гг.
Accuracy of precipitation forecasts for 2009–2018

<i>Осадки</i>	<i>Точность прогноза осадков</i>	
	<i>p=5</i>	<i>p=15</i>
Месяц		
Март	7/9 (77,8%)	7/9 (77,8%)
Апрель	3/10 (30%)	3/10 (30%)
Май	6/8 (75%)	5/8 (62,5%)
Июнь	1/8 (12,5%)	2/8 (25%)
Июль	4/7 (57,1%)	5/7 (71,4%)
Август	2/7 (28,6%)	2/7 (28,6%)
Сентябрь	3/9 (33,3%)	4/9 (44,4%)
Октябрь	4/8 (50%)	4/8 (50%)
Ноябрь	8/9 (88,9%)	7/8 (87,5%)
Декабрь	6/9 (66,7%)	5/9 (55,6%)
Итого	44/84 (52,4%)	44/84 (52,4%)

Метеорология
Антуков В.Н., Митин В.Ю.

Точность модели – отношение количества верных прогнозов к суммарному количеству верных и неверных прогнозов. Варианты с $Prog = 0$, отмеченные в табл. 3 звездочкой, на практике почти не встречаются вследствие сужения диапазона для нормы. Таким образом, точность случайного прогноза близка к 0,5, а точность прогноза по модели должна, по крайней мере, превышать эту цифру, но для хороших моделей она составляет 70% и выше.

Данные проверки для температуры и осадков для различных месяцев при $p=5$ и $p=15$ приведены в табл. 4, 5.

Для повышения точности и возможности учета большего количества предикторов можно рассматривать модели третьего уровня. В этих моделях изначально используется более широкий набор предикторов (расширенный базис с количеством компонент rb), из которого случайным образом выбирается b компонент для исходного базиса, число таких случайных вариантов базиса велико (несколько тысяч вариантов). Для каждого варианта базиса строится модель второго уровня и определяется ее точность за последние 10 лет (T_{10}), за последние 20 лет (T_{20}), за последние 40 лет (T_{40}) и средняя точность $T=(T_{10}+T_{20}+T_{40})/3$. Из всех вариантов отбираются s моделей с наилучшей средней точностью.

Итоговым прогнозируемым значением считается ранговое значение, которое чаще всего встречалось при прогнозировании с использованием наилучших базисов среди j вариантов.

В качестве основного варианта модели, используемого при реальном прогнозировании, выбран вариант с параметрами $j=11$, $b=8$, $br=16$, $q=0.4$ и расширенным базисом предикторов $\{mt(m-3), mt(m-2), mt(m-1), mo(m-3), mo(m-2), mo(m-1), dt(m-3), dt(m-2), dt(m-1), do(m-3), do(m-2), do(m-1), mo(m-1), kt(m-3), kt(m-2), kt(m-1), ko(m-3), ko(m-2), ko(m-1), \mu t(m-3), \mu t(m-2), \mu t(m-1), \mu o(m-3), \mu o(m-2), \mu o(m-1)\}$, в результате для каждого месяца и климатического сезона выбраны конкретные наборы базисных компонент, дающие за последние 40 лет высокую среднюю точность.

Результаты исследования и их обсуждение

Поскольку точность, служившая в моделях второго уровня критерием проверки, является по существу еще одним критерием отбора из большого количества вариантов в моделях третьего уровня, последние модели нуждаются в дополнительной проверке устойчивости; объектом проверки в данном случае являются не лучшие пары предикторов, а лучшие базисы предикторов.

В табл. 6 представлены результаты проверки прогнозов в 2020 г.

Таблица 6

Проверка прогнозов аномалий температуры и осадков в 2020 г.
Verification of forecasts for temperature and precipitation anomalies in 2020

Проверка	Температура			Осадки		
	Прогноз	Реальное значение	Итог	Прогноз	Реальное значение	Итог
1	2	3	4	5	6	7
Январь	1	1	Верно	1	1	Верно
Февраль	1	1	Верно	1	1	Верно
Март	1	1	Верно	1	1	Верно
Апрель	1	1	Верно	-1	1	Неверно
Май	1	1	Верно	1	1	Верно
Июнь	1	-1	Неверно	-1	1	Неверно
Июль	1	1	Верно	-1	-1	Верно
Август	1	0	н/а*	-1	0	н/а
Сентябрь	1	1	Верно	-1	0	н/а
Октябрь	1	1	Верно	-1	-1	Верно
Ноябрь	-1	0	н/а	1	0	н/а
Декабрь	1	1	Верно	-1	-1	Верно

* н/а – нет аномалии

Метеорология
Антуков В.Н., Митин В.Ю.

Из данных табл. 6 следует, что за 11 месяцев 2020 г. было дано 9 верных прогнозов аномалий температуры из 10 (90%) и 7 верных прогнозов аномалий осадков из 9 (77.8%), что можно считать хорошим результатом для месячных прогнозов.

На рис. 2 показано распределение средних значений точности T моделей, по которым строится прогноз, по месяцам.



Рис. 2. Средняя точность $T=(T_{10}+T_{20}+T_{40})/3$ для 11 лучших моделей прогнозирования температуры и осадков на месяц

Fig. 2. The average accuracy $T=(T_{10}+T_{20}+T_{40})/3$ of the 11 best models for predicting temperature and precipitation for a month

Таким образом, величины T для температуры в каждом месяце превышают 0,74, а максимальное значение в ноябре составляет 0,886. Для осадков средние точности T ниже 0,7 только в апреле и в августе.

На рис. 3 приведены аналогичные графики для прогнозирования аномалий температурного режима и осадков на следующий климатический сезон.

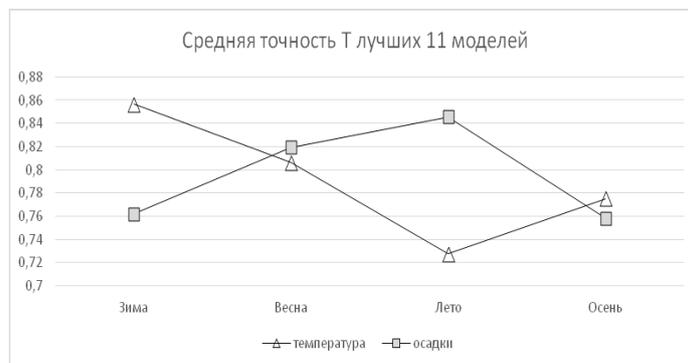


Рис. 3. Средняя точность $T=(T_{10}+T_{20}+T_{40})/3$ для 11 лучших моделей прогнозирования температуры и осадков на климатический сезон

Fig. 3. The average accuracy $T=(T_{10}+T_{20}+T_{40})/3$ of the 11 best models for predicting temperature and precipitation for a season

Из графика на рис. 3 видно, что все значения средней точности T лежат выше 0,7. При этом температура лучше всего прогнозируется летом, а осадки – зимой.

Заключение

Предложены модели прогнозирования температуры и осадков, основанные исключительно на идеях статистической обработки данных, с минимальной исходной информацией. В качестве предикторов используются значения средней температуры и сумм осадков предшествующих периодов и их статистические характеристики.

Для каждого месяца (климатического сезона) определены наборы предикторных переменных, дающие в рамках описанных статистических моделей высокую точность (как

Метеорология

Аптуков В.Н., Митин В.Ю.

правило, не ниже 0,7) при проверке на последних 10–40 годах. Учитывая, что эти модели определены путем широкого перебора, в котором критерием отбора является выполнение данных условий, точность моделей при реальных прогнозах может несколько снизиться. Тем не менее модели дают хорошие результаты в 2020 г: 9 верных прогнозов аномалий температуры из 10 (90%) и 7 верных прогнозов аномалий осадков из 9 (77,7%).

Предложенные модели предполагают возможность различных модификаций: изменение шкалы, критерия отбора лучших предикторов, диапазона истории, компонентов расширенного базиса предикторов, методики оценки точности, учет глобального тренда и т.п.

Дальнейшее существенное усовершенствование моделей может быть связано с поиском новых типов значимых предикторов, включающих новые факторы, влияющие на погодные условия и климат, а также другие скрытые параметры, например характеристики, получаемые в результате спектрального анализа случайных климатических рядов.

Библиографический список

1. Гирс А.А., Кондратович К.В. Методы долгосрочных прогнозов погоды. СПб.: Гидрометеоиздат, 1978. 344 с.
2. Малинин В.И. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2007. 279 с.
3. Дегтярев А.С., Драбенко В.А., Драбенко В.А. Статистические методы обработки метеорологической информации. СПб: ООО «Андреевский издательский дом», 2015. 225 с.
4. Аргучинцева А.В. Методы статистической обработки и анализа гидрологических наблюдений. Иркутск: Изв-во Иркут. гос. ун-та, 2007. 105 с.
5. Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2008. 408 с.
6. Арженовский С.В., Молчанов И.Н. Статистические методы прогнозирования. Ростов н./Д., 2001. 74 с.
7. Данные среднесуточных температур и суточных сумм осадков с 1887 по 2018 г. / Всерос. науч.-исслед. инстит. гидромет. информ. М., 2021. URL: <http://meteo.ru/data> (дата обращения: 10.12.2020).
8. Данные среднесуточных температур и суточных сумм осадков с 2019 по 2020 г. / Всерос. науч.-исслед. инстит. гидромет. информ. М., 2021. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/summary/28224.htm> (дата обращения: 10.12.2020).
9. Дубовиков М. М. Индекс вариации и его приложение к анализу фрактальных структур // Научный альманах Гордон. 2003. № 1. С. 5–33.
10. Дубовиков М.М., Крянев А.В., Старченко Н.В. Размерность минимального покрытия и локальный анализ фрактальных временных рядов // Вестник РУДН. 2004. Т. 3. № 1. С. 30–44.
11. Солнцев Л.А., Иудин Д.И., Снегирева М.С., Гелашвили Д.Б. Фрактальный анализ векового хода средней температуры воздуха в г. Нижнем Новгороде // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2007. № 4. С. 88–91.
12. Кузьминых Е.В. Фрактальный анализ климатических рядов: магистерская диссертация. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2012. 84 с.
13. Волегов С.В. Измерение фрактальной размерности одномерных рядов // Междисциплинарные исследования: сб. мат. конф. Т. 1. Пермь, 2013. С. 76–78.
14. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Изд-во Института компьютерных исследований, 2002. 656 с.
15. Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 261 с.
16. Аптуков В.Н., Митин В.Ю. Фрактальный анализ метеорологических рядов с помощью метода минимального покрытия // Географический вестник. 2019. № 2(49). С. 67–79.
17. Митин В.Ю. Фрактальные характеристики рядов базовых климатических параметров в г. Перми // Вестник Пермского университета. Серия «Математика. Механика. Информатика». 2020. № 1(48). С. 47–52.
18. Теплицын Г.П. Прогнозирование сумм осадков и среднемесячных температур месяцев теплого периода года по месяцам предшествующего холодного периода // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2010. № 25. С. 64–67.
19. Теплицын Г.П., Зинцова Э.А. О связи осадков и температуры холодного и последующего теплого периода на юге Хабаровского края // Метеорология и гидрология. 2011. № 10. С. 70–73.
20. Аптуков В.Н., Митин В.Ю. Статистическая модель прогнозирования среднемесячных аномалий температурного режима и осадков в г. Перми // Цифровая география: мат. Всерос. науч.-практ. конф. с межд. участием. Пермь, 2020. Т. 1. С. 359–361.

References

1. Girs, A.A., Kondratovich, K.V. (1978), "Methods of long-time forecast of weather", Leningrad, Russia.

Метеорология

Аптуков В.Н., Митин В.Ю.

2. Malinin V.I. (2007), "Statistical methods of analysis of hydrometeorological information", Saint Petersburg, Russia.
3. Degtyaryov, A.S., Drabenko, V.A., Drabenko, V.A. (2015), "Statistical methods of processing of meteorological information", Saint Petersburg, Russia.
4. Arguchintseva, A.V. (2007), "Methods of statistical processing and analysis of hydrometeorological information", Irkutsk, Russia.
5. Sikan, A.V. (2008), "Methods of statistical processing of hydrometeorological information", Saint Petersburg, Russia.
6. Arzhenovski, S.V., Molchanov, I.N. (2001), "Statistical methods of forecast", Rostov-na-Donu, Russia.
7. "Data on average daily temperatures and daily precipitation totals from 2019 to 2020" (2021), All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information, available at: <http://meteo.ru/data> (Accessed 10.12.2020).
8. "Data on average daily temperatures and daily precipitation totals from 2019 to 2020" (2021), All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information, available at: <http://www.pogodaiklimat.ru/summary/28224.htm> (Accessed 10.12.2020).
9. Dubovikov, M.M. (2003), "Variation index and its application to the analysis of fractal structures", *Scientific almanac Gordon*, no. 1, pp. 5–33.
10. Dubovikov, M.M., Kryanev, A.V., Starchenko, N.V. (2004), "Dimension of minimal covering and local analysis of fractal time series", *PFUR Bulletin*, vol. 3, no. 1, pp. 30–44.
11. Solntsev, L.A., Iudin, D.I., Snegireva, M.S., Gelashvili, D.B. (2007), "Fractal analysis of the age course of average air temperature in Nizhny Novgorod", *Bulletin of Nizhny Novgorod University* 2007, no. 4, pp. 88–91.
12. Kuz'minykh, E.V. (2012), "Fractal analysis of climatic series", Master Thesis, Saint Petersburg, Russia.
13. Volegov, S.V. (2013), "Measuring of fractal dimension of one-dimensional series". *Interdisciplinary investigations: materials of scientific and practical conference* (April 2013, Perm, Russia), vol 1, pp. 76–78.
14. Mandelbrot, B. (2002), "Fractal geometry of nature", Institute of computer researches, Moscow, Russia.
15. Feder, E. (1991), "Fractals", Mir, Moscow, Russia.
16. Aptukov, V.N., Mitin, V.Y. (2019), "Fractal analysis of meteorological series with help of minimal covering method", *Geographical Bulletin*, no. 2, pp. 67–39.
17. Mitin, V.Y. (2020), "Fractal characteristics of basic climatic parameters in Perm", *Perm State University Bulletin. Mathematics. Mechanics. Informatics*, no. 1(48), pp. 47–52.
18. Teplitsin, G.P. (2010), "Forecasting of total precipitation and mean monthly temperatures of warm year period months by the months of preceding cold period". *Actual problems of forest complex*, no. 25, pp. 64–67.
19. Teplitsin, G.P., Zintsova, E.A. (2011), "On the correlation between precipitation and temperature of cold period and next warm period in the south of Khabarovsk region". *Meteorology and hydrology*, no. 10, pp. 70–73.
20. Aptukov, V.N., Mitin, V.Y. (2020), *Digital geography: materials of the all-Russian scientific and practical conference* (16–18 September 2020, Perm, Russia), vol. 1, pp. 359–361.

Поступила в редакцию: 20.12.2020

Сведения об авторах

About the authors

Валерий Нагимович Аптуков

доктор технических наук, профессор кафедры фундаментальной математики, Пермский государственный национальный исследовательский университет;
614990, Россия, Пермь, ул. Букирева, 15

Valery N. Aptukov

Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Fundamental Mathematics, Perm State University;

15, Bukireva St., Perm, Russia, 614990

e-mail: aptukov@psu.ru

Виктор Юрьевич Митин

ассистент кафедры фундаментальной математики, Пермский государственный национальный исследовательский университет;
614990, Россия, Пермь, ул. Букирева, 15

Victor Yu. Mitin

Assistant, Department of Fundamental Mathematics, Perm State University;

15, Bukireva St., Perm, Russia, 614990

e-mail: victormitin@ya.ru

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Аптуков В.Н., Митин В.Ю. Статистические модели прогнозирования среднемесячной температуры и месячной суммы осадков в г. Перми // Географический вестник = Geographical bulletin. 2021. № 2(57). С. 84–95. doi: 10.17072/2079-7877-2021-2-84-95.

Please cite this article in English as:

Aptukov, V.N., Mitin, V.Yu. (2021). Statistical models for forecasting average monthly temperature and monthly precipitation amount in Perm. *Geographical bulletin*. No. 2(57). Pp. 84–95. doi: 10.17072/2079-7877-2021-2-84-95.