

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра Математического и компьютерного моделирования

Моделирование климатических изменений и оценка возможных

гидрометеорологических рисков

**АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ**

студентки 2 курса 247 группы

направление 09.04.03 – Прикладная информатика

механико-математического факультета

Алимпиевой Марии Александровны

Научный руководитель

профессор, д.ф.м.н., доцент

Д.В. Кондратов

Зав. кафедрой

зав.каф., д. ф. – м. н., доцент

Ю.А. Блинков

Саратов 2019

**Введение.** Необходимо отметить, что в последние годы большое внимание уделяется проблеме глобальных климатических изменений. Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) пришла к выводу, что одной из причин глобальных изменений климата в течение последнего столетия является интенсивное развитие промышленности, способствующее увеличению выбросов в атмосферу продуктов сжигания углеродного топлива, что приводит к увеличению концентрации углекислого газа в атмосфере. Предсказать, какие именно изменения климата могут быть таким образом спровоцированы, пока невозможно. Единственным способом получения более или менее достоверных оценок будущих климатических изменений является построение модели климатической системы.

Современные системы моделирования атмосферы - это досконально проработанные программные комплексы с широкой областью применений. Более точный прогноз для конкретной территории позволяет минимизировать убытки для экономики.

Погодные явления оказывают значительное влияние на состояние не только экономики страны, но и отдельные её регионы. В связи с этим управление гидрометеорологическими рисками является условием обеспечения гидрометеорологической безопасности и должно осуществляться как на микро-, так и на макроэкономическом уровне.

Актуальность настоящей работы определяется необходимостью изучения климатических изменений для уменьшения гидрометеорологических рисков в экономике.

Цель исследования состоит в оценке гидрометеорологических рисков и их влияния на экономику России.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- 1) Изучить влияние климатических изменений на экономику России;
- 2) Проанализировать различные модели прогноза изменения климата и обработки гидрометеорологической информации;
- 3) На примере двухкомпонентного анализа связей между арктической осцилляцией, интенсивностью планетарной высотной фронтальной зоны (ПВФЗ) и Эль-Ниньо построить уравнения прогностической связи и оценить возможные гидрометеорологические риски.

4) На языке программирования Python разработать программу для построения уравнений прогностической связи между арктической осцилляцией, интенсивностью планетарной высотной фронтальной зоны и оценки возможных гидрометеорологических рисков.

Научная новизна исследования исследования заключается в применении двухкомпонентного анализа для описания взаимосвязи атмосферных процессов. В работе была дана оценка возможных гидрометеорологических рисков от этих процессов.

Магистерская работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников и двух приложений. В первой главе «Моделирование климатических изменений», состоящей из двух подразделов, описывается история математического моделирования и воздействие климатических изменений на экономику России. Вторая глава «Глобальные и мезомасштабные модели атмосферы» состоит из двух разделов и трех подразделов и содержит информацию о компьютерных моделях атмосферы. В третьей главе «Математический аппарат в исследовании атмосферных процессов», состоящей из двух разделов и пяти подразделов, описываются математические методы в метеорологии, разработана программа на языке Python для двухкомпонентного анализа взаимосвязей и оценки гидрометеорологических рисков.

На материалах магистерской работы были сделаны публикации в соавторстве. Также материалы были использованы при подготовке к докладам на Международную конференцию по итогам научно-исследовательской и производственной работы студентов за 2018 и 2019 годы и в открытом конкурсе с международным участием «Будущее в наших руках».

**Основное содержание работы.** В первой главе описывается, как на протяжении длительного времени исследования атмосферы носили исключительно качественный характер и основывались только лишь на данных немногочисленных наблюдений и гипотезах. Впоследствии, наблюдения стали носить систематический характер и уже в XIX веке в различных странах основываются первые метеорологические службы. Уже на раннем этапе исследований стало ясно, что в атмосферные процессы носят существенно непериодический характер, что не позволяет напрямую предсказывать погодные

условия в будущем с той же лёгкостью, как предсказываются морские приливы [1].

В 1860 году Уильям Феррель опубликовал серию статей, в которых математические методы впервые применялись при рассмотрении движений жидкости на вращающейся Земле. Работы Ферреля послужили стимулом к развитию физико - математической теории атмосферных движений, которая в настоящее время составляет основу динамической метеорологии [2].

Компьютерные технологии начали применяться лишь с 40-х годов прошлого века. В 1946 году в рамках проекта по созданию первого цифрового электронного компьютера ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Calculator) Джон фон Нейман предложил сделать одним из его основных применений решение задачи численного прогноза погоды [3]. Даже несмотря на использование компьютера, исходная задача Ричардсона не была существенно упрощена: предварительно в 1948 - 49 годах Чарни и Эллиасен несколько изменили систему уравнений, исключив из её решений акустические волны и введя ряд дополнительных приближений. Таким образом, была разработана первая компьютерная модель атмосферы. Чарни, Фьёртофт и фон Нейман осуществили в 1950 первый успешный численный прогноз погоды [4].

Уже в 1951 году Чарни на основании всестороннего исследования пришёл к выводу, что использование в численном моделировании полной системы уравнений движения атмосферы в принципе возможно и, более того, позволит достигнуть более реалистичных результатов [1]. Таким образом, необходимое количество приближений определяется исключительно доступными вычислительными ресурсами. Только в 1960 - х модели, основанные на полной системе уравнений в формулировке Бьёркнеса и Ричардсона, пришли на смену баротропному и бароклинному приближению. Компьютерные модели атмосферы непрерывно развивались, и с ростом доступной вычислительной мощности становилось возможным использовать меньшее количество упрощений при формулировке системы уравнений.

Что касается экономики, то здесь особая роль отводится проблемам устойчивого развития территорий, в том числе оценке экономической устойчивости регионов [1]. Современная экономическая деятельность ведётся в услови-

ях неопределенности, поэтому ожидаемые доходы и расходы не могут быть рассчитаны однозначно. Поскольку отклонения плановых и фактических величин доходов и расходов имеет случайную природу, негативные последствия неопределенности результатов экономической деятельности принято характеризовать понятием риска. Риски экономической деятельности связаны, в том числе, с воздействием изменения погоды и климата [4]. Гидрометеорологическая среда способна оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на социально-экономические системы: погодо-климатические условия выступают в роли природных ресурсов в сельскохозяйственном производстве, энергетике, лесном хозяйстве, водном хозяйстве и т.д. В то время неблагоприятные климатические изменения затрагивают все регионы и страны мира. К сожалению, их негативные последствия значительны и постоянно возрастают. Ущерб для мировой экономики уже оценивается в сотни миллиардов долларов США в год, а в перспективе до 2100 года может он достигнуть 20 процентов глобального валового продукта [5].

**Во второй главе** дается описание компьютерным моделям атмосферы. Они разрабатывались исследовательскими центрами, университетами и метеослужбами различных стран. Атмосферные модели обычно подразделяют на классы в соответствии с пространственным масштабом моделируемых явлений — модели глобальной циркуляции, региональные (мезомасштабные модели) [7].

В моделях глобальной циркуляции атмосферы рассматриваются процессы планетарного масштаба. Примерами современных моделей глобальной циркуляции являются GlobalForecastSystem (GFS), разработанная в США, UnifiedModel (UM) метеослужбы Великобритании, GME службы погоды Германии и другие.

Региональные модели атмосферы нацелены на моделирование атмосферных процессов в некотором ограниченном регионе. Здесь область моделирования существенно меньше, чем в глобальных моделях, появляется возможность использовать меньший шаг сетки и включить в рассмотрение более широкий круг процессов. Примерами мезомасштабных моделей являются NAM (NorthAmericanMesoscale), Eta, RUC (RapidUpdateCycle), ARPS (AdvancedRegionalPredictionSystem), разработанные в США, LM

(LokalModel) службы погоды Германии, COSMO (европейский проект на основе разработок метеослужб Германии, Швейцарии, Италии, Греции, Польши, Румынии и России).

Также в этой главе подробно описывается система атмосферного моделирования WRF.

Weather Research and Forecasting (WRF) — одна из наиболее современных и разработанных систем численного прогноза погоды и атмосферного моделирования. В настоящее время WRF позиционируется в качестве единого рабочего инструмента для совместного использования научно-исследовательскими учреждениями и метеослужбами [10].

Основные компоненты WRF изображены в соответствии с рисунком 1 и включают в себя динамические ядра, программные модули представления физических процессов (Physics Packages) и интерфейс их взаимодействия с динамическими ядрами (Physics Interface), модуль вариационного усвоения данных метеонаблюдений WRF-Var и модель химического состава атмосферы WRF - Chem. Внешними компонентами WRF являются система подготовки входных данных WRF Preprocessing System (WPS), система объективного анализа данных стандартных метеонаблюдений OBSGRID, различные программные средства визуализации и последующей обработки (пост-процессинга) выходных данных WRF (результатов моделирования) [9].

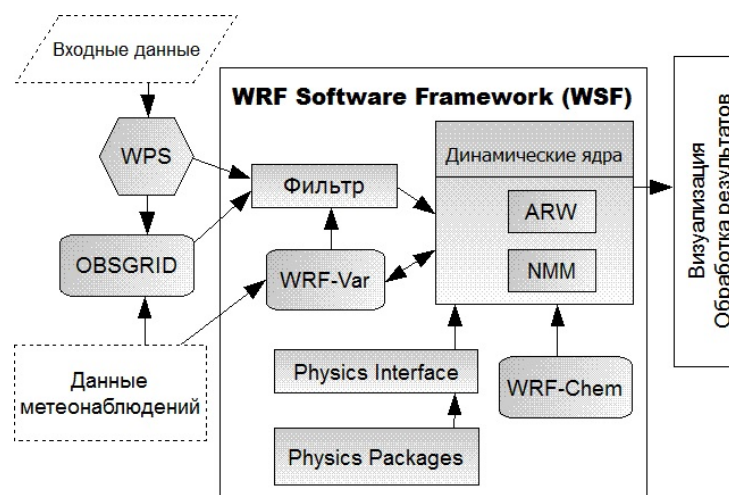


Рисунок 1 — Структура программной системы WRF

**В третьей главе** представлены некоторые численные и статистические методы прогноза климатических изменений и обработки гидрометеорологической информации.

Из численных методов представлены полулагранжев метод, сетки на сфере и полунявный метод, а из статистических - регрессионный, корреляционный анализ и авторегрессионная модель.

На основе авторегрессионной модели был описан двухкомпонентный анализ взаимосвязи арктической осцилляции, интенсивностью ПВФЗ и Эль-Ниньо. При анализе использовались временные ряды ежемесячных значений АО -  $x_1$ , интенсивности ПВФЗ -  $x_2$  и значения индекса ЭНЮК -  $x_3$  с 1950 - 2010 годы. Эти временные ряды задавались как  $x_i^{n_l} = 1, l=1,2,3$ , где  $t$  - время с шагом 1 год,  $n$  - длина ряда.

Арктическая осцилляция - это индекс, характеризующий циклическое колебание давления в полярных широтах.

Влияние ПВФЗ характеризуется увеличением горизонтальных градиентов температуры и давления в средней и верхней тропосфере с большим протяжением в умеренных и субтропических широтах.

Эль-Ниньо - это колебание температуры поверхностного слоя воды в экваториальной части Тихого океана, которое оказывает заметное влияние на климат и северного, и южного полушарий.

Для исследования взаимосвязей используется причинность по Грэнджеру. Это понятие используется в эконометрике (анализе временных рядов), формализующее понятие причинно-следственной связи между временными рядами. Причинность по Грэнджеру является необходимым, но не достаточным условием причинно - следственной связи.

Согласно этому подходу, который чаще всего называют «причинностью по Грейнджеру», воздействие характеризуется как «степень зависимости» текущего значения  $x_k$  от предшествующих значений  $x_j$  при фиксированных предшествующих значениях самого  $x_k$  прочих рассматриваемых процессов и, если таковые имеются. Количественной мерой направленной связи является при этом разность ошибок прогноза эмпирических моделей. Как и любая чисто эмпирическая характеристика, эта величина гарантирует не выявление физической причинно- следственной связи, но часто оказывается лучшим прибли-

жением (следующим шагом) к ней по сравнению с положением и величиной максимума взаимной корреляционной функции, обеспечивая в любом случае дополнительную информацию о взаимных зависимостях между наблюдаемыми процессами.

Для попарного анализа в данной работе использовалась процедура, в которой при оценке каждой связи  $j \rightarrow k$  сравнивались ошибки прогноза двух эмпирических авторегрессионных (АР) моделей процесса  $x_k$  - индивидуальной (1):

$$x_k(t) = a_{k,0} + \sum_{l=1}^{d_k} a_{k,l}x_k(t-l) + \xi_k(t), \quad (1)$$

и двухкомпонентной (2):

$$x_k(t) = a_{k,k,0} + \sum_{l=1}^{d_k} a_{k,k,l}x_k(t-l) + \sum_{l=1}^{d_{k,j}} a_{k,j,l}x_j(t-l) + \xi_{k,j}(t), \quad (2)$$

где  $a_{k,0}$  и  $a_{k,k,0}$  - постоянный член индивидуальной и двухкомпонентной АР модели;  $a_{k,l}$   $a_{k,j,l}$  - коэффициенты индивидуальной и двухкомпонентной АР модели;  $x_k(t-l)$  и  $x_j(t-l)$  - значения процессов в предыдущий момент времени;  $d_k$  - порядок индивидуальной модели (и "индивидуальной составляющей" двухкомпонентной модели);  $d_{k,j}$  - число последовательных предыдущих значений процесса  $x_j$ , от которых зависит текущее  $x_k$ ;  $a_{k,l}$  - коэффициенты индивидуальной модели,  $\xi_k$  и  $\xi_{k,j}$  - остаточные ошибки. Параметры (коэффициенты) моделей и средние квадраты ошибки прогноза  $\sigma_k$  и  $\sigma_{k,j}$  (дисперсии шумов  $\xi_k$  и  $\xi_{k,j}$ ) индивидуальной и двухкомпонентной АР модели для анализируемых временных рядов. Дисперсии шумов оценивались на основе метода наименьших квадратов.

Помимо всех видов рисков, связанных с экономической деятельностью человека, существует особый вид - гидрометеорологические риски. Они отображают угрозу потери лицом, или организации части своих ресурсов за счет изменения климата.

Эти процессы в исследуемой работе выбраны не случайно. Именно их колебание ведет к изменению климата не только на глобальном уровне, но и на уровне государства. С колебаниями АО связаны суровые морозы зимой и



аномально жаркий летний период. Усиление интенсивности ПВФЗ приводит к обильным осадкам и сильным ветрам. Засухи в традиционно влажных и наводнения в традиционно сухих регионах объясняются природным феноменом Эль-Ниньо. Рассмотрение процессов в паре дает качественную оценку гидрометеорологическим рискам.

Предположим, в качестве оценки такого вида рисков будем выступать среднее квадратичное отклонение остаточной ошибки  $\xi_{kj}$  двухкомпонентной АР модели (3):

$$\sigma = \sqrt{\xi_{kj}} \quad (3)$$

Чем больше значение  $\sigma$ , тем больше необходимо провести мероприятий для минимизации экономических ущербов для конкретной территории. В нашем случае - это территория Российской Федерации.

Программа для построения уравнений прогностической связи между арктической осцилляцией, интенсивностью планетарной высотной фронтальной зоны и оценки возможных гидрометеорологических рисков была разработана на языке программирования Python. Причем запуск тестовой программы не возможен без наличия модуля с функциями (modul.py) и входных данных для тестирования. Поэтому создается отдельная папка, куда помещаются файлы: prog.py, modul.py, «Арктическая осцилляция.txt», «Интенсивность ПВФЗ.txt», «ЭНЮК.txt».

Тестируемая программа prog.py выводит на экран консоли среды Anaconda следующее:

1. Графики среднегодового хода индекса АО, интенсивности ПВФЗ и индекса ЭНЮК;
2. Порядок индивидуальной и для двухкомпонентной авторегрессионных моделей;
4. Коэффициенты авторегрессии как для индивидуальной, так и для двухкомпонентной АР моделей;
5. Остаточные ошибки индивидуальной  $\xi_k$  и двухкомпонентной  $\xi_{k,j}$  АР моделей.

6. Среднее квадратичное отклонение остаточной ошибки  $\sigma$  двухкомпонентной модели авторегрессии.

В соответствии с рисунком 2 представлен скриншот выведенных результатов на консоли в среде Anaconda.

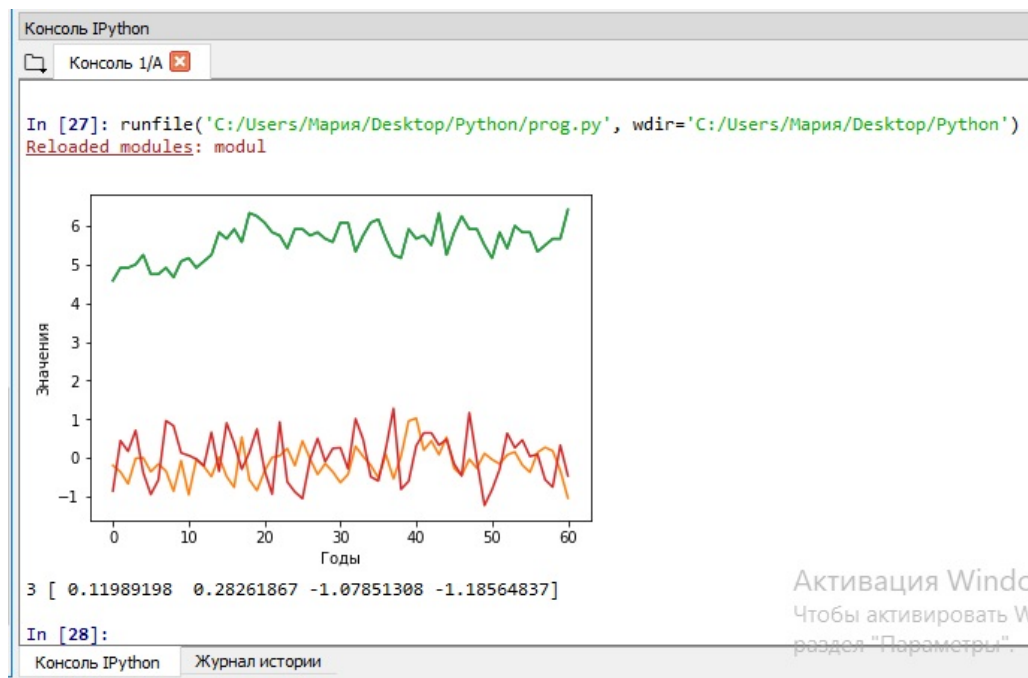


Рисунок 2 — Скриншот выведенных результатов в среде Anaconda [составлено автором]

**В заключении** можно утверждать, что современные системы атмосферного моделирования динамично развиваются как в рамках численного, так и в рамках статистического методов. Особое внимание необходимо уделить программному обеспечению, которое в настоящее время доступно для свободного пользования. Оно заметно упрощает вычисления и позволяет создавать более точные прогнозы.

В исследовании из статистических методов применялась авторегрессионная модель. Она реализовывалась в программном обеспечении «Anaconda», которое представляет из себя дистрибутив языка программирования Python. В её среде программирования были разработаны программы для построения моделей прогноза взаимосвязей между АО, интенсивностью ПВФЗ и ЭНЮК. На примере двухкомпонентного анализа связей между АО, интенсивностью ПВФЗ и ЭНЮК с учетом среднемноголетнего осреднения получены новые результаты, которые дополняют и детализируют характеристики связи, ос-

нованные на попарном анализе без учета сезонности. На основании построенных моделей индивидуальной и двухкомпонентной авторегрессии выявлены эффекты разного знака воздействия интенсивности ПФФЗ и АО.

Также на основании двухкомпонентного анализа взаимосвязей были выявлены показатели гидрометеорологических рисков. Наибольший из этих показателей отмечался у связи АО на интенсивность ПФФЗ.

Таким образом, необходимо создать информационную систему поддержки принимаемых решений для эффективного управления гидрометеорологическими рисками. А для этого нужно подбирать подходы к управлению рисками в целях минимизации экономического ущерба, наносимого неблагоприятными гидрометеорологическими условиями на исследуемой территории. Эти подходы будут способствовать достижению устойчивых результатов финансово-хозяйственной деятельности региона государства.