

На правах рукописи

Дубровина Елизавета Сергеевна

**ТЕМПЕРАТУРА КАК АБИОТИЧЕСКИЙ ФАКТОР  
ДИНАМИКИ ПОПУЛЯЦИИ ЧЕЛОВЕКА**

03.02.08 – экология (биология)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата биологических наук

Нижний Новгород  
2012

Работа выполнена на кафедре экологии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского» (ННГУ)

Научный руководитель: доктор биологических наук,  
профессор кафедры экологии ННГУ  
Моничев Александр Яковлевич

Официальные оппоненты: доктор биологических наук,  
заведующий кафедрой биофизики ННГУ  
Воденеев Владимир Анатольевич

доктор физико-математических наук,  
заведующий лабораторией ИПФ РАН  
Яхно Владимир Григорьевич

Ведущая организация: Институт экологии Волжского бассейна РАН  
(г. Тольятти)

Защита состоится «16» мая 2012 г. в 15<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.12 Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 1, биологический факультет.

E-mail: dis212.166.12@gmail.com

факс: (831) 462-30-85

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, с авторефератом – в сети Интернет на сайте Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского по адресу: <http://www.unn.ru>, на сайте ВАК России – <http://vak2.ed.gov.ru/catalogue>.

Автореферат разослан «14» апреля 2012 года

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат биологических наук



М.С. Снегирева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

Численность популяции человека, так же как и численность популяций других живых организмов, с одной стороны, поддерживается ее внутренними механизмами регуляции, а с другой стороны, подвержена воздействию внешних факторов. Одним из наиболее важных абиотических факторов, оказывающих влияние на здоровье людей и численность популяции человека, является температура приземного слоя атмосферы.

Большое значение для популяций живых организмов и природных экосистем имеет распределение и динамика суточных температур в течение года. Так длительные периоды жаркой погоды провоцируют развитие пожаров, а также негативно сказываются на здоровье людей, страдающих сердечно-сосудистыми и некоторыми иными заболеваниями.

Результаты наблюдений за глобальным климатом говорят о его многочисленных долговременных изменениях. Увеличение мировой приземной температуры, составляющее  $0.76^{\circ}\text{C}$  за последние 100 лет, сопровождается изменением количества осадков, солености океана, ветровых режимов и других метеорологических характеристик (Climate change, 2007).

Согласно наиболее поддерживаемой в настоящее время гипотезе, причиной современного изменения климата является усиление парникового эффекта в результате антропогенного воздействия. Основная роль при этом отводится углекислому газу, выделение которого в окружающее пространство происходит во все нарастающих темпах благодаря производственной деятельности человека. Сопровождающие парниковый эффект неустойчивость климата и рост частоты экстремальных погодных явлений могут вызвать в отдаленной перспективе (при значительном увеличении среднегодовой температуры) повышение заболеваемости и увеличение смертности населения. В этих условиях актуальным является изучение возможных путей развития и последствий этих сложных и взаимосвязанных явлений, для обоснованной оценки которых желательно их динамическое описание.

В большинстве моделей, построенных для прогноза последствий парникового эффекта, принимаются либо детерминированные частные прогнозы изменения численности популяции человека (Снытин и др., 1994), либо его отдельные сценарии (Барцев и др., 2005; Braddock et al, 1994). При этом, как правило, рассматривается только один из взаимосвязанных процессов (изменение температуры атмосферы либо нарушение углеродного цикла) (Барцев и др., 2005; Израэль, Семенов, 2003; Кондратьев, Крапивин, 2004), в то время как полная модель должна описывать взаимодинамику численности человеческой популяции, концентрации атмосферного углекислого газа и температуры приземного слоя воздуха.

В связи с вышеизложенным, **целью исследования** является выявление и анализ особенностей динамики температуры приземного слоя атмосферы, как абиотического фактора, а также прогноз возможных последствий ее изменения для популяции человека в результате парникового эффекта.

### **Задачи исследования:**

1. Проанализировать особенности динамики среднесуточных температур, как абиотического фактора, оказывающего влияние на популяцию человека (на примере г. Н.Новгорода).
2. Сравнить ход среднесуточных температур в различных географических точках и выявить факторы, определяющие его пространственную изменчивость по отношению к популяции человека.
3. Построить краткосрочный прогноз среднегодовой температуры на основе статистических и нейросетевых моделей.
4. Сформулировать и идентифицировать математическую модель динамики численности популяции человека в условиях усиления парникового эффекта и оценить его возможные последствия.

### **Научная новизна исследования:**

Было впервые показано, что особенностями температурной динамики, которые играют роль важного абиотического фактора для популяций живых организмов и подвержены значительным изменениям в последние десятилетия, являются ее «меандровая» и хаотическая детерминированность. «Меандровая» детерминированная составляющая проявляется в наличии длительных периодов стабильной температуры с резкими перепадами между ними, а хаотическая детерминированность характеризуется сильным разбросом значений температуры относительно среднего и наличием ее интенсивных колебаний различной частоты.

Впервые выявлена и проанализирована пространственная неоднородность выраженности детерминированной составляющей температуры в различных регионах.

Была разработана принципиально новая динамическая модель, равноправно описывающая динамику численности популяции человека, концентрации углекислого газа и температуры, а также учитывающая внутренние механизмы этих процессов и их взаимовлияние. Данная модель позволила оценить влияние уровня энергопотребления на динамику температуры атмосферы и выявить ее запаздывающую реакцию на снижение концентрации углекислого газа в атмосфере.

Анализ возможного влияния последствий усиления парникового эффекта на динамику популяции человека позволил дать оценку минимального уровня дополнительной смертности, приводящего к резкому катастрофическому падению численности популяции человека, а также оценить характерные времена ожидаемых катастроф.

### **Научно-практическая значимость работы:**

Предложенный подход позволяет выявить влияние парникового эффекта на важные для популяции человека особенности динамики среднесуточных температур. Результаты работы позволяют прогнозировать последствия роста численности популяции человека, проявляющиеся в увеличении концентрации углекислого газа в атмосфере и повышении среднегодовой температуры. Модель дает возможность рассмотреть и оценить сценарии развития парникового эффекта при различном

уровне энергопотребления. Методика может быть использована для прогноза хода среднегодовой температуры на территории других регионов.

### **На защиту выносятся следующие основные положения:**

1. В течение последних десятилетий наблюдается усиление отрицательного воздействия динамики среднесуточной температуры на популяцию человека, проявляющееся в усилении ее «меандрового» поведения, характеризующегося длительными периодами стабильной температуры и последующими резкими перепадами.
2. Влияние динамики среднесуточной температуры на популяцию человека пространственно неоднородно: наблюдается усиление меандровой детерминированности хода среднесуточной температуры в центре европейской части России по сравнению с более западными и более восточными регионами, а также повышение ее разброса и хаотичности в северных городах и городах с большей населенностью.
3. Модельный прогноз роста концентрации углекислого газа в атмосфере и ее температуры с учетом динамики численности человеческой популяции, воздействующей на парниковый эффект, характеризуется линейным ростом на первом этапе и снижением темпов прироста в последующем. Уменьшение температуры атмосферы возможно только при 11-кратном снижении энергопотребления и происходит с большим запаздыванием относительно снижения концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере.
4. В рамках рассматриваемой модели возможны катастрофические сценарии динамики численности популяции человека, вызванные усилением парникового эффекта, однако характерные времена наступления ожидаемых катастроф велики и составляют порядка 1000 лет.

### **Апробация работы**

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на X Всероссийском популяционном семинаре (Ижевск, 2008), III Всероссийском с международным участием конгрессе студентов и аспирантов-биологов «Симбиоз-Россия 2010» (Нижегород, 2010), Всероссийской конференции молодых ученых, посвященной 50-летию первой молодежной конференции в ИЭРиЖ «Экология: сквозь время и расстояние» (Екатеринбург, 2011), IX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Биологический мониторинг природно-техногенных систем» (Киров, 2011), научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности города» (Дзержинск, 2011), Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (Москва, 2012).

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 14 научных работ, в том числе 4 – в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, выводов, списка литературы, включающего 126 наименований, в том числе 51 на иностранных языках, 3-х приложений. Работа изложена на 148 страницах машинописного текста (из них 130 страниц основного текста), содержит 1 таблицу и 75 рисунков.

## **Личный вклад соискателя**

Автор принимал непосредственное участие в анализе температурных данных, составлении, идентификации и анализе динамической модели развития парникового эффекта, а также прогнозе хода среднегодовой температуры на основе статистических и динамической моделей.

## **Благодарности**

Автор выражает искреннюю и глубокую благодарность своему научному руководителю проф. А.Я. Моничеву. Автор благодарит за любезно предоставленные метеорологические данные директора ГПБЗ «Керженский» Е.Н. Коршунову, сотрудников ГПБЗ «Керженский» О.Ю. Гореловскую и А.В. Муравьеву, за содействие и поддержку исследований директора НООО «Компьютерный экологический центр», к.б.н. Р.Д. Хабибуллина, за конструктивные советы и замечания сотрудника лаб. экологического прогнозирования ИЭРиЖ УрО РАН, к.б.н. И.А. Кшнясева, за консультации по реализации вычислительных алгоритмов математического моделирования сотрудника кафедры теории управления и динамики машин ННГУ, к.ф.-м.н., О.Ю. Кольцову. Автор выражает благодарность за внимательное отношение к работе и помощь в ее подготовке зав. каф. экологии, проф. Д.Б. Гелашвили и всем сотрудникам кафедры экологии ННГУ.

## **ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ**

Освещены вопросы влияния температуры как абиотического фактора на человеческую популяцию, а также основные проблемы изучения динамики численности популяции человека и парникового эффекта как экологического феномена. Рассмотрены вопросы усиления проявлений парникового эффекта при антропогенном воздействии. Оценены возможности применения метода математического моделирования для выявления механизмов и прогноза данного явления. Проведен обзор математических моделей, описывающих изменение численности популяции человека, концентрации углекислого газа в атмосфере и ее температуры. Рассмотрены возможные сценарии развития парникового эффекта, полученные на основе моделей разных авторов. Дана оценка полученных результатов и намечены пути дальнейшего развития модельного прогнозирования.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Прогноз роста температуры в г. Н.Новгороде и анализ суточных температурных рядов производились на основе данных ВНИИГМИ-МЦД (<http://meteo.ru/data/>).

Для идентификации глобальной модели использовались данные о содержании CO<sub>2</sub> в атмосфере на основе результатов измерений в обсерватории Мауна-Лоа (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>), а также данные об изменении приземной температуры атмосферы (по результатам измерения метеорологических станций управления океаническими и атмосферными исследованиями, NOAA, <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/research/anomalies/index.html>).

Для прогноза динамики температуры в г. Н.Новгороде были использованы **статистические и нейросетевые методы прогноза**, включающие ряд модельных подходов, основанных на анализе температурных изменений прошлых лет. Подобные модели можно разделить на следующие категории:

1. Регрессионные модели строятся путем выявления уравнений регрессии, наилучшим образом приближающих связи между зависимыми (температурой) и независимыми (временем) переменными и, таким образом, описывающих тренды прогнозируемых характеристик.

2. Модели в виде случайных процессов используются в тех случаях, когда в распределении экспериментальных точек во времени не просматривается какой-либо закономерности (разброс точек очень велик).

3. Модели нейронных сетей способны воспроизводить чрезвычайно сложные нелинейные временные зависимости путем выявления скрытых закономерностей внутри временных рядов.

Для прогнозирования температуры атмосферы использовались возможности методов статистического прогнозирования временных рядов и моделирования нейронных сетей, предоставляемые системой *Stat Soft STATISTICA 7*.

При анализе динамики среднесуточной температуры были использованы **методы анализа нелинейных процессов**:

1. Фурье-анализ обычно используется для выявления выраженности тех или иных частотных составляющих во временных рядах. Для построения спектров Фурье и вычисления их выравненности на основе индекса Шеннона использовалась программа, написанная автором в среде *Borland C++Builder 6*.

2. Вейвлет-анализ используется для частотного анализа рядов с нерегулярной периодической составляющей. Вейвлет-анализ производился в системе *Math Works Matlab R2007a MATLAB*.

3. Мультифрактальный анализ, основанный на методе максимумов модулей вейвлет-преобразования, позволяет выделить в температурной динамике некоторое количество компонентов, характеризуемых определенным значением экспоненты Гельдера, отражающей детерминированность (регулярность) процесса (Stanley et al, 1999). Величина экспоненты Гельдера характеризует степень детерминированности поведения температуры. Чем она выше, тем более процесс детерминирован (регулярен). Мультифрактальный анализ, основанный на методе максимумов модулей вейвлет-преобразования, производился в программном модуле *FracLab 2.05*.

Для выявления региональных особенностей динамики среднесуточных температур и определения факторов, объясняющих ее пространственную вариабельность, использовался факторный анализ в системе *Stat Soft STATISTICA 7*.

Основным инструментом, использованным в исследовании глобальных проявлений парникового эффекта, является *математическое моделирование* на основе дифференциальных уравнений, описывающих процессы роста численности популяции человека и развития парникового эффекта. Для решения и качественного анализа дифференциальных уравнений использовалась программа, написанная автором в среде *Borland C++Builder 6*.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### 1. Анализ среднегодовой динамики температуры г. Н.Новгорода

В соответствии с поставленными задачами, первым этапом настоящего исследования был анализ хода температуры атмосферы в г. Н.Новгороде.

Анализируя ход температуры, следует различать ее среднегодовую и внутригодовую динамику. В первом случае принимаются во внимание усредненные за год значения, которые позволяют выявить общую тенденцию многолетнего изменения температуры и дать ее прогноз на перспективу. С другой стороны, нагревание нижних слоев атмосферы может оказывать влияние на процессы с большим временным разрешением, в том числе на межсуточное колебание температур. Анализ подобных температурных колебаний в разные годы дает возможность более полно оценить происходящие климатические изменения и их влияние на популяции живых организмов и природные экосистемы.

Изучение данных о распределении средней температуры приземного слоя воздуха в Нижнем Новгороде по месяцам показывает, что ее величина в последние годы, в большинстве случаев, превышает среднее многолетнее значение, рассчитанное за период с 1880 по 1950 г. В последние 40 лет, среднегодовая температура воздуха г. Н. Новгорода выросла, примерно, на  $1.5^{\circ}\text{C}$ , что более чем в два раза превышает прирост ее общемирового значения за тот же период. Амплитуды многолетних температурных колебаний на территории г. Н.Новгорода также значительно превосходят мировые, что указывает на значительную роль локальных процессов в климатических изменениях на конкретных территориях.

Проведенные исследования показывают, что более или менее выраженный тренд роста температуры характерен только для зимнего и весеннего периодов, а средние летние и осенние температуры, в течение последних 60-ти лет, скорее колеблются относительно некоторого постоянного уровня.

**Резюме:** Проведенный анализ динамики приземной температуры воздуха на территории г. Н.Новгорода за весь период наблюдений с 1880 года демонстрирует активный рост ее среднегодового значения, начиная с 60-х – 70-х годов прошлого столетия. При этом рост средней температуры более характерен для зимнего и весеннего периода в сравнении с летним и осенним. Для того чтобы более полно оценить возможное влияние изменения температуры на живые организмы, в том числе человека, необходимо проанализировать особенности внутригодовой динамики среднесуточных температур.



## 2. Определение детерминированной составляющей в ходе среднесуточных температур

Важной характеристикой хода температуры является ее средний межсуточный перепад, а его значение, в свою очередь, определяется двумя особенностями температурной динамики: разбросом значений температуры и частотой ее перепадов. Разброс температуры характеризует ширину области значений, которые температура может принимать в течение определенного промежутка времени, например, сезона. Частота перепадов определяет, насколько часто теплые периоды сменяются более холодными и наоборот.

В динамике среднесуточных температур можно выделить два вида детерминированности:

– «Меандровая» детерминированность проявляется в виде длительных периодов постоянной температуры с резкими перепадами между ними. Периоды длительной стабильности температуры проявляются в низкой частоте резких межсуточных перепадов, а также преобладании низких частот спектра Фурье и, соответственно, его слабой выравненности (рис. 1А).

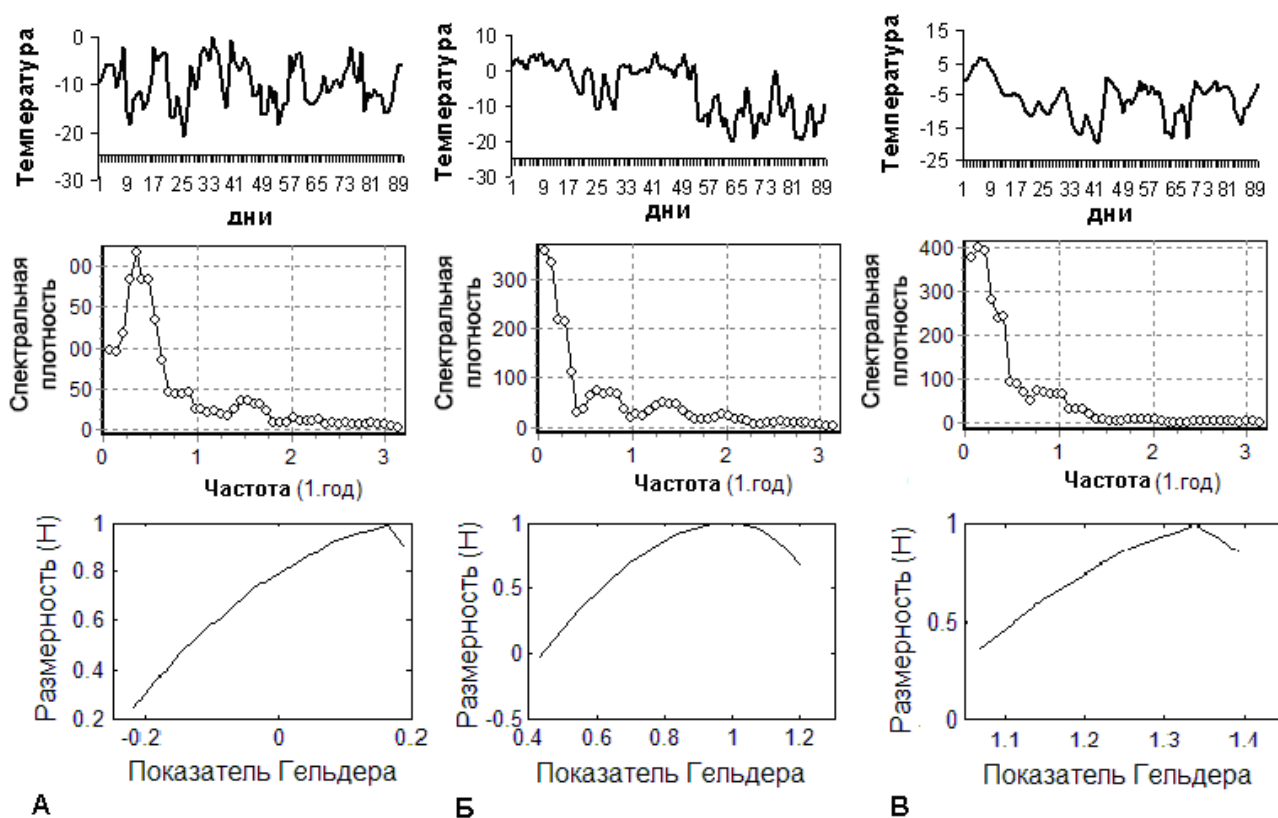


Рис. 1. Различные типы динамики температуры, их спектры Фурье и спектры сингулярностей:

А – 1978 г.: низкая «меандровая» детерминированность;

Б – 2007 г.: высокая «меандровая» детерминированность;

В – 2009 г.: высокая хаотическая детерминированность.

– Хаотическая детерминированность проявляется в виде колебаний температуры разной частоты, т. е. сильной «изрезанности» температурной кривой и высоком разбросе ее значений. В отличие от характеристик спектра Фурье,

чувствительных к температурным колебаниям, равномерно проявляющимся на протяжении всего изучаемого периода, более чувствительными к хаотической изменчивости температуры являются показатели мультифрактального спектра.

Для анализа хаотических временных рядов используется мультифрактальный анализ, основанный на методе максимумов модулей вейвлет-преобразования. Он позволяет выделить в температурной динамике некоторое количество компонентов, характеризующихся определенным значением экспоненты Гельдера, отражающей детерминированность (регулярность) процесса (Stanley, 1999). Зависимость фрактальной размерности некоторого компонента динамики от гельдеровской экспоненты называется спектром сингулярностей (рис. 1). Спектр сингулярностей, в отличие от спектра Фурье, обладает большей чувствительностью к хаотическим колебаниям среднесуточной температуры, неравномерно проявляющимся на различных участках исследуемой кривой. Чем сильнее этот спектр сдвинут вправо, тем большей хаотической детерминированностью обладает соответствующая ему температурная кривая, тем более она «изрезана».

Высокая хаотическая детерминированность характеризуется сдвигом мультифрактального спектра в сторону больших значений показателя Гельдера (рис. 1В).

На рис. 2 показано изменение выравненности спектра Фурье годового хода температуры в период с 1936 по 2009 гг. Оно демонстрирует увеличение выравненности спектра Фурье в 80-е и середине 90-х гг. и ее снижение в последующие годы. Это подтверждает предположение о росте «меандровой» детерминированности хода температуры в последнее десятилетие.

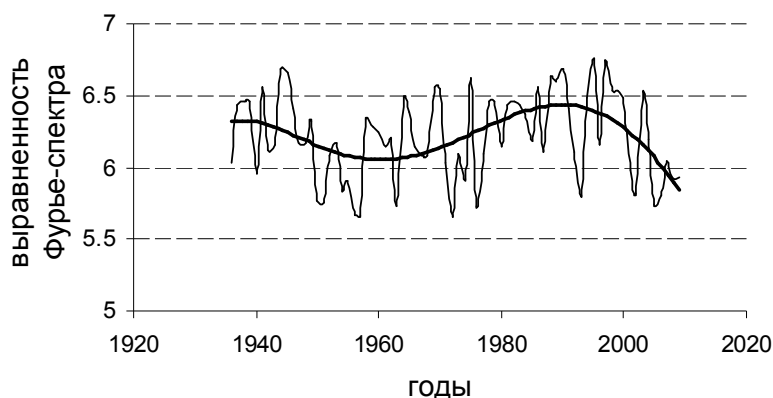


Рис. 2. Выравненность Фурье-спектра годового хода температуры в г. Н.Новгороде в период 1936-2009 гг.

Спектр сингулярности в период 70-90-х гг. сдвигается влево (в сторону меньших экспонент Гельдера), что характеризует снижение хаотической детерминированности хода температуры. При этом снижается ширина спектра, который в конце 80-х – начале 90-х гг. сходится в одну точку. С конца 90-х гг. спектр сингулярностей сдвигается в сторону больших экспонент Гельдера и его ширина растет (рис. 3). Таким образом, в последние десятилетия детерминированный хаос в динамике температур усиливается и захватывает все больше гельдеровских компонент.

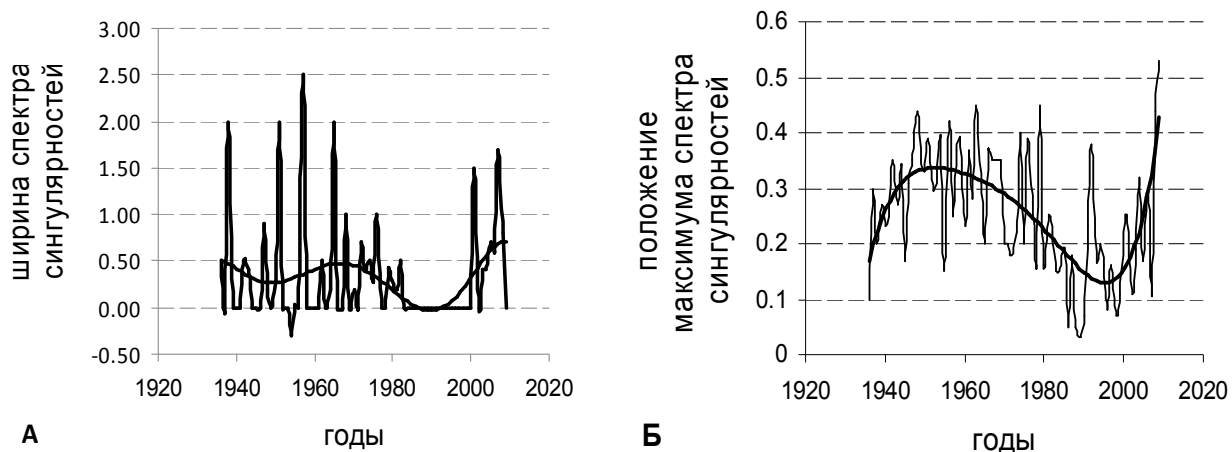


Рис. 3. Изменение ширины (А) и положения максимума (Б) спектра сингулярностей ряда среднесуточных температур в период с 1936 по 2009 гг.

Подобные изменения в детерминированности температурной кривой отражаются в динамике величины среднего межсуточного перепада, который увеличивается в 90-е гг. и уменьшается в 2000-е гг. (рис. 4).

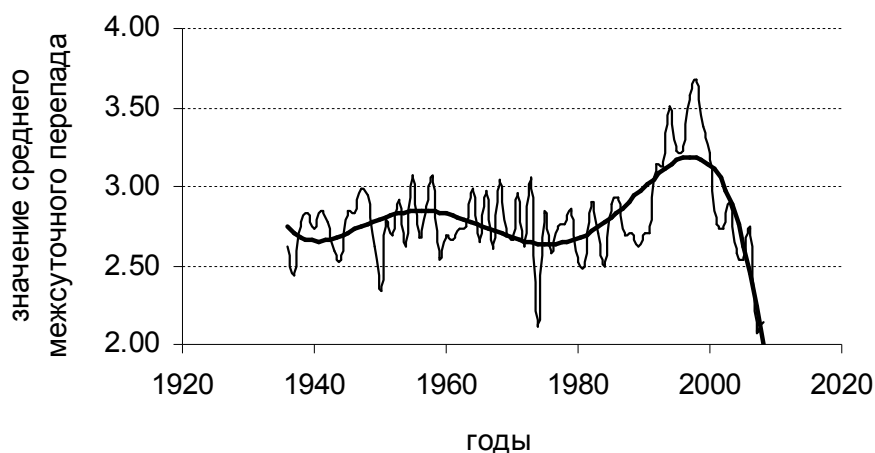


Рис. 4. Изменение значения среднего межсуточного перепада температуры в период с 1936 по 2009 гг.

**Резюме:** Анализ динамики временных рядов среднесуточной температуры в период 1936-2008 гг. на примере г. Н.Новгорода показывает значительные изменения в выраженности детерминированных процессов, связанных с внутренней динамикой климатических систем, на фоне стохастической зашумленности в последние три десятилетия. Нами было показано, что в 70-80-е гг. наблюдается ослабление детерминированной хаотической составляющей хода температур, а в 90-2000-е гг. – ее усиление. Усиление детерминированной хаотической составляющей динамики температуры проявляется в наличии меандров: длительных периодов стабильной температуры с резкими перепадами между ними, а также в увеличении хаотической изменчивости хода температуры. Оценка масштабности влияния данного феномена на человеческую популяцию, а также ее вариабельности требует сравнения его проявления в различных географических точках.

### 3. Региональные особенности динамики среднесуточной температуры атмосферы

Для того чтобы составить более полное представление о вариабельности в изменении климата, важно понять влияние регионального фактора на такие характеристики динамики температуры как ее «меандровая» и хаотическая детерминированность.

Для анализа использовались данные температурных измерений летом 2008, 2009 и 2010 гг. в 34 крупных городах на территории Евразийского континента.

Особенности температурной кривой в определенной географической точке в определенный временной промежуток можно охарактеризовать следующими показателями: разброс значений температуры относительно среднего, частота перепадов температуры, выравненность Фурье-спектра, левая граница спектра сингулярностей, правая граница спектра сингулярностей и положение максимума спектра сингулярностей.

Для того чтобы выявить региональные особенности кривых температурного хода воспользуемся факторным анализом (Харман, 1972). На рис. 5 можно видеть, что в разные годы положение характеристик в пространстве факторов, учитывающих региональные особенности, отличается.

По данным 2010 г. наблюдается четкое разделение всех исследуемых характеристик на две группы. В первую группу входят характеристики, определяющие выраженность «меандровой» детерминированности. Это частота перепадов и выравненность Фурье-спектра. Ко второй группе относятся характеристики, описывающие хаотическую детерминированность, т.е. колебания температуры внутри отдельных «меандров». Это разброс температуры, границы и максимум спектра сингулярностей.

По данным 2008 и 2009 гг. граница между группами характеристик температурного хода является значительно более размытой, а число факторов, необходимых для описания изменчивости исследуемых характеристик, увеличивается до 4-х, по сравнению с 2010 г., для описания которого можно было ограничиться всего 2-мя факторами.

Во все исследуемые годы наблюдается тенденция снижения выравненности Фурье-спектра (усиления «меандрового» характера хода температуры) на долготе 30-50° в.д., что соответствует центральному региону Европейской части России (рис. 6). По направлению к востоку, до Урала, наоборот, происходит увеличение выравненности Фурье-спектра. Это означает, что в Фурье-спектре уменьшается доля низких частот, т.е. исчезают длительные периоды стабильной температуры (меандры). В 2008 и 2010 гг. подобная тенденция является наиболее статистически значимой и характеризуется коэффициентом детерминации ( $R^2$ ) более 0.5 (0.59 и 0.84, соответственно). 2009 г. характеризуется величиной  $R^2$ , равной 0.42, тем не менее, в этот год прослеживается аналогичная тенденция изменения характера температурной кривой с изменением долготы.

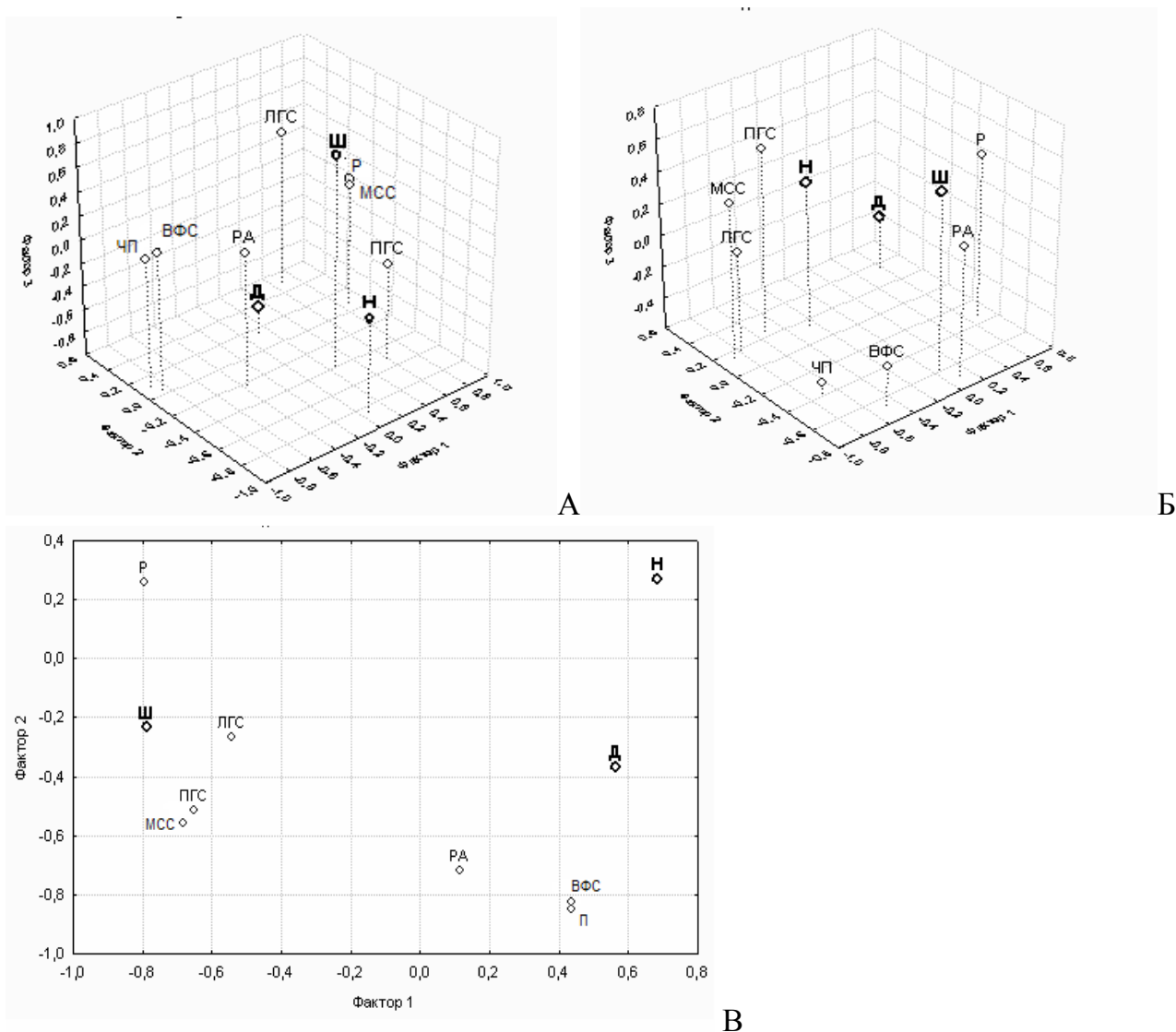


Рис. 5. Диаграмма факторных нагрузок для исследуемых характеристик хода температуры: А – 2008 г.; Б – 2009 г.; В – 2010 г.

Исследуемые характеристики: Н – численность населения города; Д – долгота; Ш – широта; Р – разброс значений температуры относительно среднего; ЧП – частота перепадов температуры; РА – размерность аттрактора температурной динамики, восстановленного в лаговом пространстве; ВФС – выравненность Фурье-спектра; ЛГС – левая граница спектра сингулярностей; ПГС – правая граница спектра сингулярностей; МСС – положение максимума спектра сингулярностей.

При увеличении широты происходит усиление разброса температуры (рис. 7). Такая тенденция также наблюдается во все исследуемые годы, но коэффициент линейной корреляции является статистически значимым на уровне менее 0.05 только для хода среднесуточных температур летом 2010 г. ( $r=0.62$ ). В 2008 и 2009 гг. коэффициент линейной корреляции между разбросом температуры и широтой ниже 0.5 и составляет, соответственно, 0.39 и 0.35. Высокий разброс температуры в северных широтах означает ее более интенсивные колебания с большей амплитудой на различных частотах. В результате температурные кривые в северных городах являются более хаотичными по сравнению с южными городами.

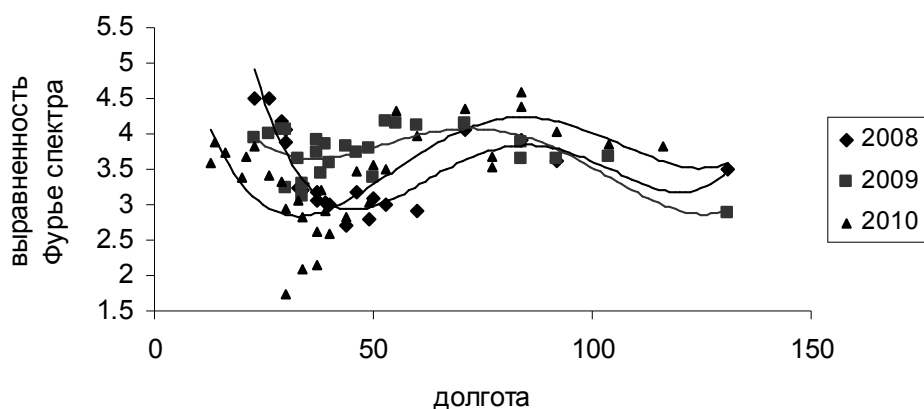


Рис. 6. Зависимость выравнивания Фурье-спектра от долготы.

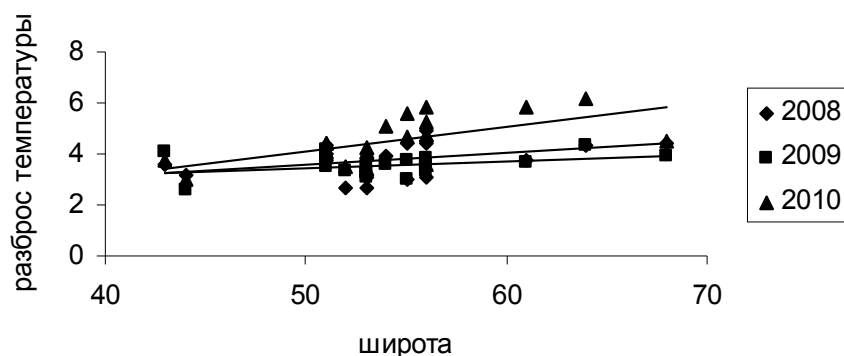


Рис. 7. Зависимость разброса температуры (среднеквадратического отклонения) от широты.

В городах, расположенных на одной широте, была выявлена определенная зависимость хода температурной кривой от населенности города: с увеличением размера города, разброс температуры возрастает (рис. 8). Эта тенденция также по-разному проявляется в разные годы: коэффициент линейной корреляции в 2008, 2009 и 2010 гг. составляет, соответственно, 0.77, 0.58 и 0.45 на уровне значимости менее 0.05. Зависимость разброса температуры от населенности города может быть связана с эффектом «тепловых островов», наблюдающимся в крупных промышленных городах. Результатом этого эффекта является повышение температуры в городе по сравнению с его окраиной, что приводит к интенсификации воздушной циркуляции между городским центром и периферией (Stathopoulou, Cartalis, 2007).

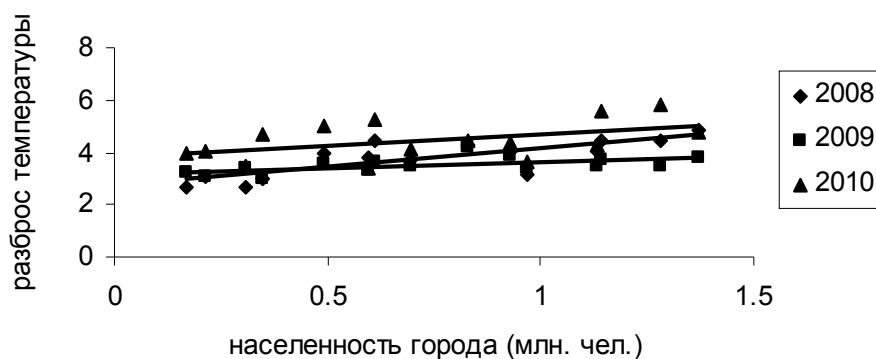


Рис. 8. Зависимость разброса температуры от населенности города.

**Резюме:** Результаты проведенного исследования показывают, что в исследуемой группе регионов проявления «меандрового» характера кривых хода температур, связанные с выраженными длительными периодами аномальных значений с последующим резким их изменением, более характерны для территорий центральной части Европейской России. В свою очередь, большая хаотизация температурной кривой, соответствующая значительным межсуточным перепадам, характерна для северных регионов, а также для городов с большой населенностью. Обе рассматриваемые особенности хода температур в наибольшей степени проявляются в 2010 г. Интенсивное проявление «меандровой» детерминированности температуры, оказывающей воздействие на различные биологические системы, в том числе популяцию человека, в городах центра Европейской части России, а также ее подверженность изменениям в течение последних десятилетий, обуславливает важность прогноза температуры на перспективу.

#### **4. Прогнозирование температуры г. Н.Новгорода на основе статистических и нейросетевых моделей**

Наиболее простым способом прогноза температуры атмосферы является аппроксимация имеющихся данных, полученных на основе измерений ее многолетней динамики. Уравнение, наилучшим образом приближающее существующий температурный тренд, можно получить с помощью регрессионного анализа. Результаты показывают, что зависимость температуры от времени, скорее всего, носит линейный характер. Однако достаточно низкое значение коэффициента детерминации  $R^2=0.23$  означает сильный разброс точек вокруг линии тренда, что говорит о необходимости учета стандартной ошибки линии регрессии и остаточного разброса точек вокруг нее.

Для учета периодической составляющей хода температуры был использован метод спектрального анализа с помощью преобразования Фурье, позволяющий выявить частоты наиболее выраженных температурных колебаний. Прогнозируемое к 2050 г. значение среднегодовой температуры воздуха колеблется от 4.5 до 8.5 °С (рис. 9А).

Поскольку временной ход среднегодовой температуры приземного слоя воздуха характеризуется большим разбросом ее значений относительно среднего, требуются специальные подходы для его прогнозирования. К таким подходам относится исследование динамики температуры как случайного процесса и выявление скрытых закономерностей ее хода путем обучения нейронных сетей.

Прогнозы, сделанные на основе моделей экспоненциального сглаживания и ARIMA, демонстрирует среднее увеличение температуры до 8-8.5 °С в течение ближайших 50 лет (рис. 9Б, рис. 9В). Однако очень широкий доверительный интервал, вычисленный для модели ARIMA, говорит о возможности значительных вариаций прогнозируемой среднегодовой температуры (от 2 до 16 °С в период до 2057 г.).

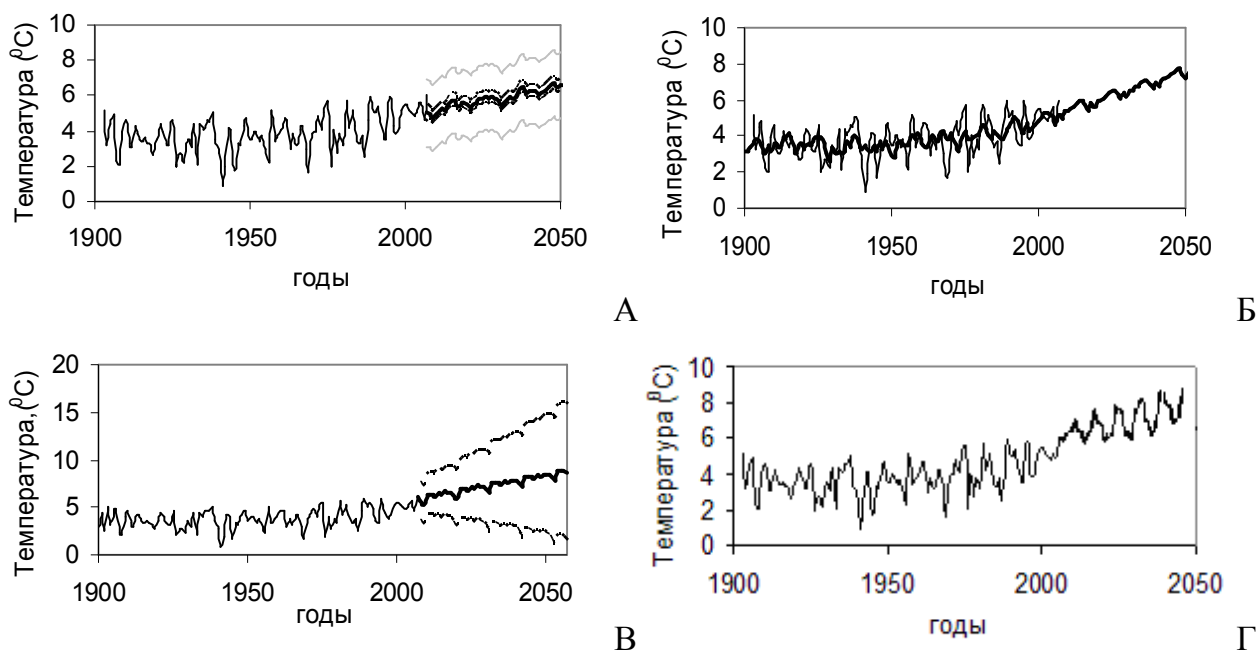


Рис. 9. Прогноз роста среднегодовой температуры атмосферы г. Н.Новгорода на основе регрессионного анализа (А), модели экспоненциального сглаживания временного ряда (Б), модели ARIMA (В) и моделей нейронных сетей (Г).

Другим способом прогнозирования температуры атмосферы может служить моделирование с помощью нейронных сетей, позволяющее воспроизвести более сложные закономерности поведения временных рядов. По сравнению с прогнозами, сделанными на основе экспоненциального сглаживания и модели ARIMA, данный прогноз позволяет воспроизвести колебания с большими амплитудами и, по-видимому, более близкие к реальным данным. Кроме того, нейросетевые модели не требуют явного задания периода сезонной составляющей и вида функции, задающей тренд: обе эти характеристики подбираются в процессе работы самой нейронной сети. Данный прогноз демонстрирует среднее увеличение температуры до  $7.5^{\circ}\text{C}$  к 2057 г. (рис. 9Г), что соответствует оценке, полученной нами ранее на основе статистических методов.

**Резюме:** Прогнозы сделанные на основе статистического и нейросетевого анализа хода температуры атмосферы в г. Н.Новгороде показывают ее увеличение на  $2-2.5^{\circ}\text{C}$  к 2050 г. Прогнозирование изменения температуры атмосферы на более длительную перспективу, а также оценка последствий ее изменения для популяции человека требует разработки динамической модели, учитывающей внутренние механизмы и взаимодействия изучаемых процессов.

## 5. Глобальная модель динамики популяции человека и развития парникового эффекта

В связи с тем, что прогнозы, сделанные на основе анализа временного ряда температуры, не учитывают механизмы, лежащие в основе ее роста и характеризуются широкой доверительной областью, они применимы лишь на коротких временных интервалах. Для построения более продолжительных прогнозов необходимы изучение природы и механизмов исследуемого процесса, а также разработка описывающей его математической модели.



Предлагаемая модель описывает взаимодинамику численности популяции человека, концентрации атмосферного углекислого газа и температуры приземного слоя воздуха и включает в себя все три уравнения, описывающие изменение этих характеристик.

Динамика численности популяции человека рассматривается согласно модельным представлениям о ее саморегуляции, предложенным в работе (Моничев и др., 2003). Она описывается уравнением:

$$\frac{dN}{dt} = \left( \frac{B_m}{1 + aN^\gamma} - \frac{D_m}{1 + bN^\delta} \right) N, \quad (1)$$

где  $N$  – численность популяции человека;  $B_m$  – максимально возможная рождаемость;  $D_m$  – максимально возможная смертность;  $a$ ,  $b$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  – коэффициенты, определяющие процессы конкуренции и кооперации во внутривидовой регуляции рождаемости и смертности.

Согласно этим модельным представлениям увеличение численности популяции человека, сопровождающееся развитием медицины и ростом уровня жизни, приводит к снижению рождаемости и смертности. Это, с одной стороны, связано с существованием конкурентных отношений в популяции, а с другой стороны, с наличием сознательной регуляции рождаемости и смертности. Параметры  $\gamma$  и  $\delta$  в уравнении (1) отражают размер социальных групп, участвующих в этой регуляции, а параметры  $a$  и  $b$  – степень влияния экологических, экономических и других средовых факторов.

Динамику изменения концентрации углекислого газа в приземном слое воздуха можно представить как разность между скоростью его поступления в этот слой с антропогенными выбросами, которая линейно зависит от численности популяции человека, и скоростью его удаления в другие резервуары, которая пропорциональна концентрации углекислого газа в атмосфере. При этом в качестве основной составляющей углеродного обмена, способной поглощать  $\text{CO}_2$  из атмосферы, рассматривается океан.

В результате получается следующее уравнение:

$$\frac{dC}{dt} = mN - qC, \quad (2)$$

где  $C$  – концентрация углекислого газа в атмосфере;  $m$  – удельная (на душу населения) скорость роста концентрации углекислого газа, определяемая удельными выбросами его в атмосферу;  $q$  – удельная (на единицу концентрации) скорость поглощения углекислого газа океаном.

Динамика температуры приземного слоя воздуха определяется двумя процессами. С одной стороны, интенсивность поглощения атмосферой длинноволнового излучения, идущего от поверхности Земли, линейно связана с содержанием в атмосфере углекислого газа, являющегося одним из основных поглотителей излучения в длинноволновом диапазоне. С другой стороны, скорость переизлучения атмосферой полученной энергии должна возрастать с повышением ее температуры. Считая эту зависимость линейной, можно записать уравнение следующим образом:

$$\frac{dT}{dt} = rC - sT, \quad (3)$$

где  $T$  – средняя температура приземной атмосферы;  $r$  – удельная (на единицу концентрации  $\text{CO}_2$ ) скорость разогрева атмосферы;  $s$  – удельная (в расчете на градус) скорость излучения энергии углекислым газом.

Коэффициенты уравнений вычислялись на основе данных о мировом ходе температуры, динамики концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере и численности популяции человека (Шаманов, 2002).

Результаты интегрирования уравнений (1-3) показывают, что изменения во времени всех рассматриваемых переменных имеют вид логистических кривых (рис.10-12). Численность популяции человека характеризуется, в конечном итоге, снижением скорости ее роста и стабилизацией на уровне 8.5 млрд. человек.

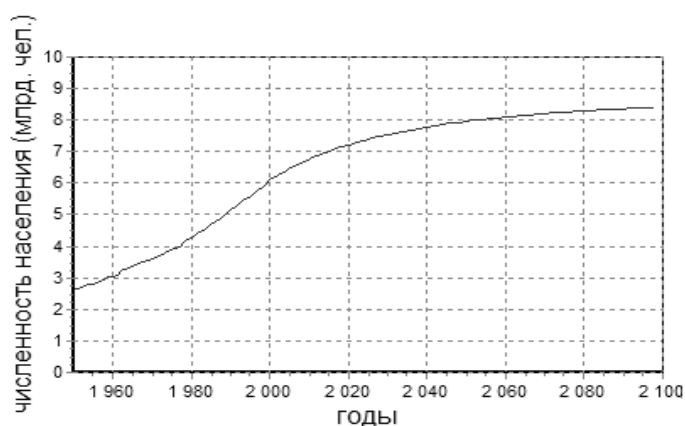


Рис. 10. Кривая роста численности популяции человека

Предложенная модель позволяет рассмотреть последствия различных сценариев энергопотребления в мире. Для этого необходимо варьировать коэффициент  $m$ , отражающий интенсивность антропогенных выбросов. При сохранении параметром  $m$  значения, соответствующего современным темпам ее роста, к 2050 г. происходит увеличение содержания диоксида углерода до 480 ppm, а средней температуры – на  $1,2^{\circ}\text{C}$  в сравнении с 1995 г. (кривая 1 на рис. 13-14).

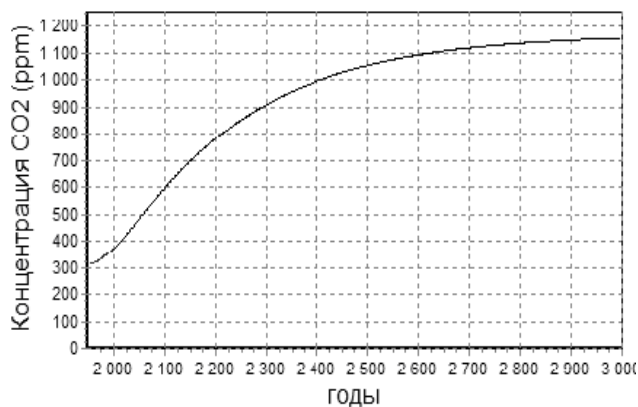


Рис. 11. Долгосрочный прогноз изменения концентрации  $\text{CO}_2$

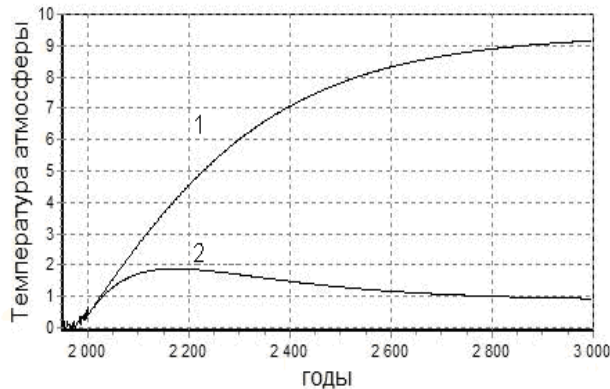


Рис. 12. Долгосрочный прогноз изменения температуры атмосферы:  
1 -  $m=0,54$ ; 2 -  $m=0,05$

Во 2-ом сценарии, характеризуемом  $4^x$ -кратным уменьшением выбросов, концентрация  $CO_2$  снижается, относительно быстро достигая в пределе значений, меньших современного уровня (кривая 2 на рис. 13). Несмотря на это, температура воздуха в краткосрочном прогнозе возрастает при любых значениях параметра  $m$ , и ее рост носит линейный характер (кривая 2 на рис. 14). При этом видно, что в течение первых 50 лет скорость возрастания температуры практически одинакова в обоих сценариях.

Если же наблюдать за изменением температуры в долгосрочном прогнозе, то можно увидеть, что при 11-кратном снижении выбросов углекислого газа за участком роста следует ее снижение (кривая 2 на рис. 12). Такое поведение, по-видимому, объясняется запаздывающей реакцией температуры на повышение в атмосфере концентрации углекислого газа. При этом время запаздывания определяется коэффициентами  $q$ ,  $r$  и  $s$ , а от интенсивности выбросов, выражаемой параметром  $m$ , зависит лишь тот уровень, до которого в итоге происходит снижение температуры.

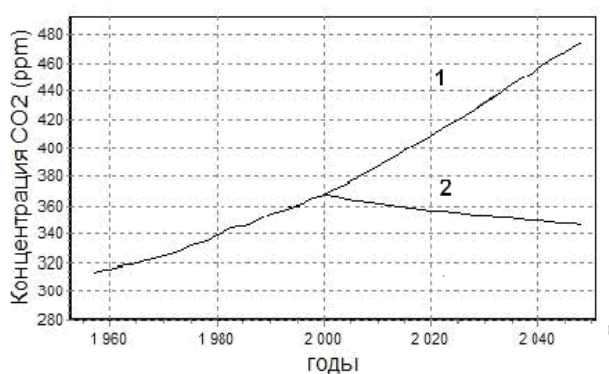


Рис. 13. Краткосрочный прогноз изменения концентрации  $CO_2$  при различных значениях коэффициента  $m$ : 1 -  $m=0,54$ ; 2 -  $m=0,135$

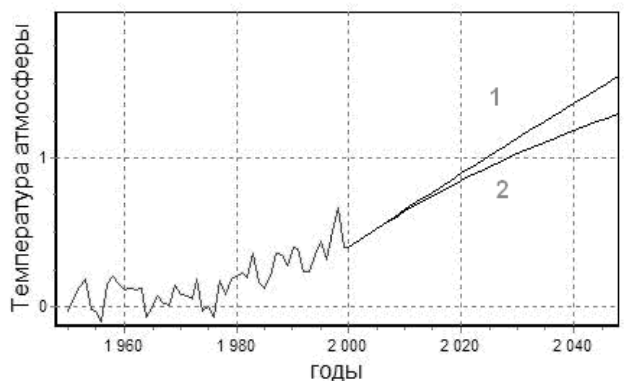


Рис. 14. Краткосрочный прогноз изменения средней температуры атмосферы: 1 -  $m=0,54$ ; 2 -  $m=0,05$

Катастрофическую составляющую влияния последствий парникового эффекта на динамику численности популяции человека можно учесть, введя в модель дополнительный член, определяющий убыль населения за счет активного влияния внешней среды. В этом случае уравнения модели (1-3) примут вид:

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dt} &= \frac{BN}{1 + aN^\gamma} - \frac{DN}{1 + bN^\delta} - d(T)N, \\ \frac{dC}{dt} &= mN - qC, \\ \frac{dT}{dt} &= rC - sT \end{aligned} \quad (4)$$

где  $d(T)$  – удельная скорость убыли населения за счет последствий парникового эффекта, зависящая от температуры атмосферы.

Предполагая, что катастрофические явления, связанные с появлением дополнительной смертности от перегрева атмосферы, возникают пороговым образом при некоторой критической температуре, имеем:

$$d = \frac{D_0 T^\chi}{D_0 + T^\chi}, \quad (5)$$

где  $D_0$  – максимальный уровень дополнительной смертности от последствий парникового эффекта;  $\chi$  – параметр, определяющий крутизну порога возрастания смертности под действием температуры.

На рис. 15 изображены результаты решения уравнений (4) при варьировании значений уровня энергопотребления в мире ( $m$ ).

Результаты моделирования показывают, что варьирование рассматриваемого параметра качественно изменяет динамику системы: стабилизация системы на некотором постоянном уровне (кривые 1) сменяется резким падением численности популяции человека и температуры с потерей равновесия (кривые 2) и последующими автоколебаниями.

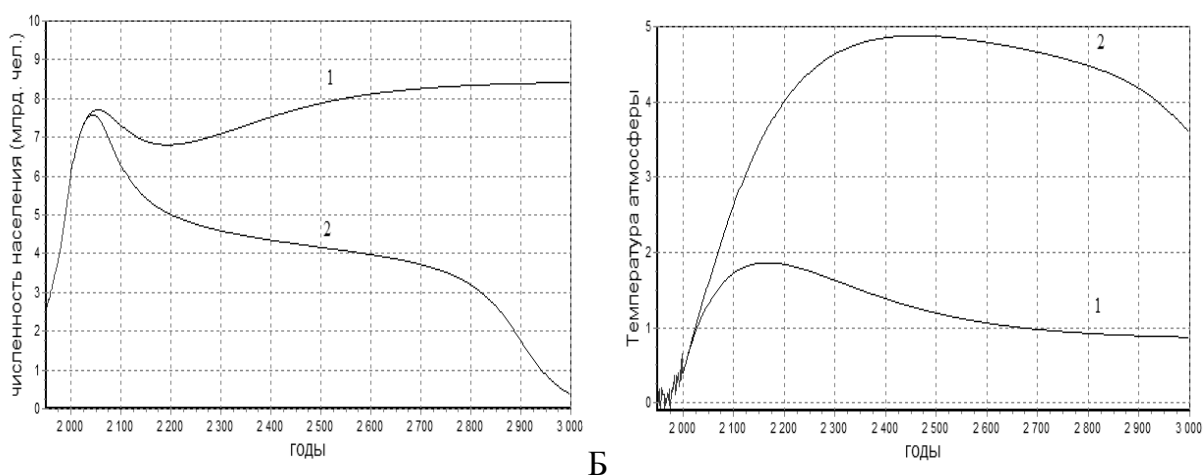


Рис. 15. Динамика численности популяции человека (А) и температуры приземного слоя воздуха (Б) при различных сценариях энергопотребления в мире и при  $D_0=23\%$  (1 -  $m=0.05$ ; 2 -  $m=0.54$ ).

**Резюме:** Результаты работы показывают, что динамика роста концентрации углекислого газа и средней температуры атмосферы при парниковом эффекте характеризуется 2-мя фазами. Это – линейный рост в ближайшие 150 лет и снижение темпов прироста в последующем. Наиболее реалистичный прогноз предполагает предельный рост температуры атмосферы при современных темпах индустриального развития на  $9^\circ\text{C}$ . Снижения уровня концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере Земли можно добиться лишь падением энергопотребления не менее чем в 4 раза, а уменьшение температуры атмосферы будет происходить с большим запаздыванием и только при 11-кратном снижении энергопотребления.

Анализ возможного влияния катастрофических последствий усиления парникового эффекта на динамику популяции человека показал, что резкое падение ее численности произойдет при увеличении дополнительной смертности до уровня 23%, однако характерные времена ожидаемых катастроф велики и составляют порядка 1000 лет. Результаты моделирования катастрофических сценариев парникового эффекта показывают, что повышение интенсивности выбросов углекислого газа в атмосферу приближает момент наступления парниковой катастрофы, увеличивает амплитуду температурных колебаний и снижает

обратимость катастрофических последствий, уменьшая шанс возвращения популяции человека в прежнее устойчивое состояние.

## **Заключение**

Проведенный анализ динамики приземной температуры воздуха демонстрирует активный рост ее среднегодового значения, начиная с 60-х – 70-х гг. прошлого столетия, сопровождающийся изменениями особенностей внутригодовой динамики среднесуточной температуры. Нами было впервые показано, что особенностями температурной динамики, являющимися важным абиотическим фактором для популяций живых организмов, в том числе человека, и подверженными значительным изменениям в последние десятилетия, являются ее «меандровая» и хаотическая детерминированность. «Меандровая» детерминированная составляющая проявляется в наличии длительных периодов стабильной температуры с резкими перепадами между ними, а хаотическая детерминированность характеризуется сильным разбросом значений температуры относительно среднего и наличием ее интенсивных колебаний различной частоты. При этом в 70-80-е гг. наблюдается ослабление детерминированной составляющей динамики температуры, а в 90-2000-е гг. ее усиление.

Выявлена пространственная неоднородность выраженности детерминированной составляющей температуры в различных регионах. Проявления «меандрового» характера кривых хода температур более характерны для территорий центральной части Европейской России. В свою очередь, большая хаотизация температурной кривой характерна для северных регионов, а также для городов с большой населенностью. Обе рассматриваемые особенности хода температур в наибольшей степени проявляются летом 2010 г.

Локальный анализ особенностей хода температуры на территории г. Н.Новгорода, впервые проведенный на основе статистических и нейросетевых моделей, позволил дать ее прогноз к 2050 г. Согласно этому прогнозу ожидается увеличение температуры на 2-2.5 °С.

Результаты моделирования показывают, что динамика роста концентрации углекислого газа и средней температуры атмосферы при парниковом эффекте характеризуется линейным ростом в ближайшие 150 лет и снижением темпов прироста в последующем. Наиболее реалистичный прогноз предполагает предельный рост температуры атмосферы при современных темпах индустриального развития на 9 °С.

Впервые с помощью представленной модели дана оценка того, что снижения уровня концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере Земли можно добиться лишь падением энергопотребления не менее чем в 4 раза, а уменьшение температуры атмосферы будет происходить с большим запаздыванием и только при 11-кратном снижении энергопотребления.

Анализ возможного влияния катастрофических последствий усиления парникового эффекта на динамику популяции человека показал, что резкое падение ее численности произойдет при увеличении дополнительной смертности до уровня

23%, однако характерные времена ожидаемых катастроф велики и составляют порядка 1000 лет.

### **Выводы:**

1. Особенность динамики среднесуточной температуры г. Н.Новгороде в плане влияния на популяцию человека выражается в ослаблении ее детерминированной составляющей в 70-80-е гг. и усилении – в 90-2000-е гг., проявляющемся в виде длительных периодов стабильной температуры с последующими значительными перепадами.
2. Воздействие меандровой детерминированности температурной динамики на популяцию человека в наибольшей степени проявляется на территории центральной части Европейской России, а большая хаотизация температурной кривой характерна для северных регионов, а также для городов с большой численностью населения.
3. Прогнозы на основе статистических и нейросетевых моделей демонстрируют среднее увеличение температуры г. Н.Новгорода на 2-3<sup>0</sup>С к 2050 г.
4. Прогноз роста концентрации углекислого газа и температуры с учетом динамики численности популяции человека при современных темпах индустриального развития предполагает увеличение температуры на 9<sup>0</sup>С до момента ее стабилизации в течение 1000 лет.
5. Уменьшение температуры атмосферы возможно при 11-кратном снижении энергопотребления и произойдет с большим запаздыванием через 150 лет после снижения концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере.
6. Увеличение смертности в популяции человека от последствий усиления парникового эффекта до уровня 23% при современном уровне энергопотребления приведет к катастрофическому неравновесному снижению ее численности с последующими колебаниями; характерные времена ожидаемой катастрофы составляют 1000 лет.

### **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Работы, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, опубликованных ВАК:**

1. **Дубровина Е.С.** Модельный анализ динамических особенностей развития парникового эффекта / Е.С. Дубровина, А.Я. Моничев // Вестник ННГУ. – 2008. – №4. – С. 97-101.
2. Моничев А.Я. Модельный анализ взаимовлияния роста темпов производства и численности населения в нижегородской области / А.Я. Моничев, **Е.С. Дубровина** // Вестник ННГУ. – 2009. – №2. – С. 145-150.
3. Моничев А.Я. Модель Лоренца и динамика хода суточных температур на территории г. Нижнего Новгорода / А.Я. Моничев, **Е.С. Дубровина** // Вестник ННГУ. – 2010. – №3. – С. 173-176.
4. **Дубровина Е.С.** Детерминированный хаос в динамике среднесуточных температур воздуха на территории г. Нижнего Новгорода / Е.С. Дубровина, А.Я. Моничев // Вестник ННГУ. – 2011. – №2(1). – С. 105-110.

**Статьи, тезисы и материалы докладов региональных и всероссийских конференций и семинаров:**

5. **Дубровина Е.С.** Модельный прогноз изменения концентрации углекислого газа и средней температуры приземного слоя воздуха в атмосфере при парниковом эффекте / Е.С. Дубровина, А.Я. Моничев // Биосистемы: организация, поведение и управление. Материалы 60-й научной студенческой конференции биологического факультета 12-13 апреля 2007 года. – Н. Новгород, – 2007. – С. 23-25.

6. **Дубровина Е.С.** Анализ особенностей динамики температуры приземного слоя атмосферы г. Нижнего Новгорода за период наблюдений с 1880 года до нашего времени / Е.С. Дубровина, А.Я. Моничев // Приволж. науч. журн. – 2008. – №4. – С. 182-188.

7. **Дубровина Е.С.** Динамика численности народонаселения и парниковый эффект (катастрофические сценарии) / Е.С. Дубровина, А.Я. Моничев // Современное состояние и пути развития популяционной биологии: Материалы X Всероссийского популяционного семинара (г. Ижевск, 17-22 ноября 2008 г.). Ижевск. – 2008. – С. 404-406.

8. **Дубровина Е.С.** Математическое моделирование как метод анализа динамических процессов в экологии // Методическое обеспечение исследовательской деятельности школьников и студентов по экологии. Н.Новгород. – 2008. – С. 13-21.

9. **Дубровина Е.С.** Прогнозирование температуры атмосферы г. Нижнего Новгорода на основе статистических и нейросетевых моделей / Е.С. Дубровина, А.Я. Моничев // Приволж. науч. журн. – 2009. – №3. – С. 116-122.

10. **Дубровина Е.С.** Уровень жизни, динамика численности человеческой популяции и последствия парникового эффекта / Е.С. Дубровина, А.Я. Моничев // Сборник тезисов III Всероссийского с международным участием конгресса студентов и аспирантов-биологов «Симбиоз-Россия 2010». – Н. Новгород. – 2010. – С. 12-13.

11. **Дубровина Е.С.** Анализ и прогноз динамики среднегодовой температуры в Нижнем Новгороде с учетом парникового эффекта // Экология глазами молодежи: Матер. VI детско-юношеской экологической ассамблеи. – Н.Новгород. – 2010. – С. 139-142.

12. **Дубровина Е.С.** Оценка особенностей динамики среднесуточной температуры атмосферы // Экология глазами молодежи: Матер. VII детско-юношеской экологической ассамблеи. – Н.Новгород. – 2011. – С. 101-102.

13. **Дубровина Е.С.** Пространственная вариативность в динамике среднесуточной температуры атмосферы // Экология: сквозь время и расстояние. Матер. конф. молодых ученых, 11-15 апреля 2011 г. / ИЭРиЖ УрО РАН. Екатеринбург. – 2011. – С. 55-59.

14. **Дубровина Е.С.** Региональные особенности внутригодовой динамики температуры атмосферы / Е.С. Дубровина, А.Я. Моничев // Биологический мониторинг природно-техногенных систем. Сб. материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием в 2 частях. Ч. 1. Киров. – 2011. – С. 121-124.

---

Подписано в печать 06.04.2012 г. Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1.  
Тираж 100 экз. Заказ № 04/12

---

Отпечатано в типографии НООО «Компьютерный экологический центр»  
603005, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 3