

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ  
Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра метеорологии и климатологии

**Исследование изменений среднегодовых температур города Базеля**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 4 курса 411 группы

направления 050305 - Прикладная гидрометеорология

географического факультета

Бебякиной Алены Сергеевны

Научный руководитель

профессор, д.ф.-м.н

должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_

подпись, дата

М.Б. Богданов

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

д.ф.-м.н

должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_

подпись, дата

М.Б. Богданов

инициалы, фамилия

Саратов 2016

**Введение.** Обоснована актуальность проблемы изучения долговременных изменений приземной температуры воздуха, а также сформулированы цели статистического анализа временного ряда среднегодовых температур города Базеля.

На формирование климата и изменение приземной температуры воздуха конкретного города влияют различные факторы: географическая широта, особенности радиационного баланса, циркуляция воздушных масс, характер подстилающей поверхности (особенности орографии и растительного покрова), рельеф (высота местности над уровнем моря, направление горных хребтов), близость морей и океанов, антропогенные воздействия (степень загрязненности атмосферы).

Для изучения климата и его изменений используются ряды метеорологических наблюдений за многолетний период (несколько десятков лет) с применением статистической обработки данных. Климат определяется не только по средним значениям метеорологических показателей, а учитывают их суточный ход, крайние значения, средние отклонения от средних величин, повторяемость определенных явлений, средние и крайние сроки начала явлений.

В последнее время проводится изучение возможного влияния на погоду и климат факторов солнечной активности. Исследования солнечно-земных связей позволят установить физические механизмы наблюдаемого взаимодействия между солнечными стимулами и ответными земными реакциями. В этом плане большое значение имеет анализ долговременных рядов инструментальных измерений метеорологических величин.

Целью настоящей работы является обзор литературы по различным факторам, влияющим на изменение приземной температуры воздуха, а также статистический анализ временного ряда среднегодовых температур города Базеля, нахождение долговременных тенденций и особенностей динамики изменения температуры на протяжении полутора столетий.

**В первой главе.** Подробно рассматриваются факторы, влияющие на изменение приземной температуры. К ним относятся: особенности общей циркуляции атмосферы, характеризуемые индексом Североатлантического колебания, климатические изменения, описываемые индексом Атлантического мультideкадного колебания, проявления солнечной активности и квазидвухлетний цикл земной атмосферы.

Под общей циркуляцией атмосферы (ОЦА) понимается совокупность основных воздушных течений в тропосфере, стратосфере и мезосфере. Важнейшими звеньями ОЦА являются зональный и меридиональный переносы в тропосфере, циклоническая деятельность, пассаты, муссоны, струйные течения и др.

Североатлантическое колебание (САК, NAO) является одной из важнейших характеристик крупномасштабной циркуляции атмосферы в северном полушарии. Оно выражено во все сезоны года и проявляется на масштабах от нескольких суток до нескольких десятилетий. Сущность САК заключается в перераспределении атмосферных масс между Арктикой и субтропической Атлантикой, при этом переход из одной фазы САК в другую вызывает большие изменения в поле ветра, переносах тепла и влаги, в интенсивности, количестве и траекториях штормов и т.п.

Атлантическое мультideкадное колебание (АМК) представляет долгопериодное изменение температуры поверхности в Северной части Атлантического океана, с холодными и теплыми фазами, длительность которых составляет 20-40 лет, а разница температур между экстремумами – 1 градус. АМК оказывает влияние на температуру воздуха и интенсивность осадков на большей части Северного полушария, на территории, как Северной Америки, так и Европы. Это влияние проявляется в изменении частоты засух и интенсивных ураганов в Атлантике.

Солнечная активность – это совокупность изменяющихся структурных образований в некоторой ограниченной области солнечной атмосферы,

связанная с усилением в ней магнитного поля от значений 10–20 до нескольких (4–5) тысяч Эрстед.

Важнейший компонент атмосферной циркуляции - квазидвухлетние колебания (КДК) зональной скорости экваториального стратосферного ветра, оказывающие значительное влияние и на динамику атмосферы средних и полярных широт. Это режим ветра восточных и западных направлений в экваториальной стратосфере, охватывающий высоты примерно от 16 до 50 км, распространяющийся в стратосфере из верхних слоев в более низкие с периодом, составляющим около 28 месяцев. Несмотря на то, что КДК наблюдаются в экваториальной зоне, они в значительной мере влияют на циркуляцию во внетропической стратосфере.

**Вторая глава.** Посвящена описанию методов обработки и анализа временных рядов, на основе которых проводится исследование пространственно-временных закономерностей. Сюда входят основные определения и формулы, нахождение параметров линейного тренда, проверка статистической однородности ряда, проверка согласия распределения с нормальным, автокорреляционная функция, спектральный анализ.

Одним из способов отображения тенденции динамического ряда является аналитическое выравнивание, то есть выравнивание с помощью аналитических формул. В этом случае динамический ряд выражается в виде функции  $\hat{y} = \hat{y}(t)$  (тренда), в которой в качестве основного фактора принимается время  $t$ , и изменения аргумента функции определяют расчетные значения  $\hat{y}(t)$ .

Критерии согласия - критерии проверки гипотезы о предполагаемом законе неизвестного распределения, требуют достаточно большой вычислительной работы, поэтому целесообразно перед тем, как их использовать, проверить с помощью более простых методов соответствия имеющихся экспериментальных данных нормальному распределению. Эти методы, естественно, обладают меньшей мощностью и позволяют установить только значительные расхождения с нормальным распределением, но если

такие расхождения будут установлены, то необходимость в применении более точных, но более сложных критериев, как правило, отпадает.

Автокорреляция означает корреляцию параметра с самим собой. Коэффициенты автокорреляции являются коэффициентами линейной корреляции между временным рядом в данный момент времени и тем же временным рядом в последующий момент времени. Для практических целей коэффициенты автокорреляции определяют по формуле:

$$R_x(r) = \frac{1}{(N-r-1)\sigma_x^2} \sum_{i=0}^{N-r-1} (x_i - \bar{x})(x_{i+r} - \bar{x})$$

где  $r$  - запаздывание,  $\bar{x}$  - среднее значение ряда,  $\sigma_x^2$  - его дисперсия. Если запаздывание мало, то в метеорологии коэффициенты автокорреляции обычно положительны, поскольку для метеорологических процессов характерна устойчивость.

С помощью автокорреляционной функции можно описать внутреннюю структуру процесса, определяемую доминирующими компонентами во временной области. В тех случаях, когда процесс складывается из составляющих разных временных масштабов, характеристики этих составляющих трудно найти по графику автокорреляции. Для решения многих задач знать распределение интенсивности процесса между составляющими различных временных масштабов, то есть необходимо описание случайного процесса в частотной области. Для этой цели служит спектральное разложение процесса. Физический смысл спектра временного ряда состоит в том, что он показывает вклад колебаний с разными частотами в полную дисперсию временного ряда.

**В третьей главе.** Представлены результаты исследования статистического анализа временного ряда среднегодовых температур города Базеля.

Нами был проанализирован временной ряд среднегодовых значений температуры города Базеля. Данные взяты с официального сайта Федерального офиса метеорологии и климатологии MeteoSwiss за период с 1864 по 2013г.

Максимальное значение среднегодовой температуры наблюдалось в 1994 году. Тогда среднегодовая температура была  $11,54\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Минимальное значение среднегодовой температуры  $7,26\text{ }^{\circ}\text{C}$  было зафиксировано в 1879 году. На основании этих данных можно рассчитать амплитуду ( $A$ ) среднегодовых температур города Базеля. Она равна:  $A = x_{\max} - x_{\min} = 11,54 - 7,26 = 4,28\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

На рисунке 1 видно, что в изменениях температуры присутствуют линейный тренд, связанный с глобальным потеплением климата.

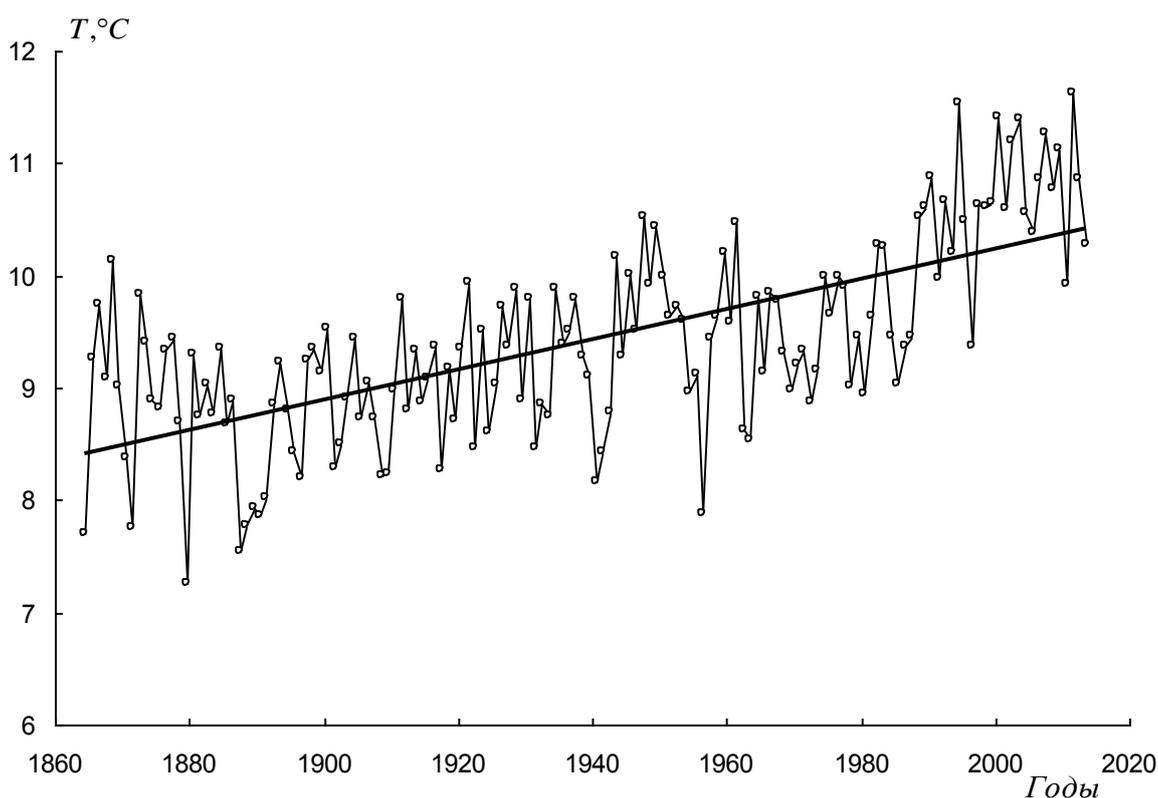


Рисунок 1 - Среднегодовое значение температуры города Базель.

С помощью метода наименьших квадратов нами были определены параметры линейного тренда среднегодовых значений температуры  $y = a + bt$ , где  $t$  – время, измеряемое в годах от начала ряда. Значение  $a$  - исходный

уровень временного ряда в значении времени  $t = 0$ ,  $b$  - угловой коэффициент прямой.

Найденные значения параметров оказались равными:

$$a = 0,013467 \pm 0,00122 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{год},$$

$$b = 8,403 \pm 0,106 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Для проверки на статистическую однородность ряда мы разделили его на две равные части. С помощью критерия Фишера мы проанализировали каждую из выборок. Рассчитав для каждой выборки стандартное отклонение  $\sigma$ , мы получили следующие значения :

$$\sigma_1 = 0,676 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\sigma_2 = 0,617 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Рассчитанное значение критерия Фишера  $F$  равно

$$F = \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right)^2 = 1,20.$$

Критическое значение критерия Фишера для уровня значимости  $\alpha = 0,01$  и степеней свободы  $k_1 = k_2$  равно 1,74.

Поскольку полученное значение  $F < F_{кр}$  гипотезу о равенстве дисперсий нельзя отвергнуть и ряд можно считать статистически однородным.

В нашей работе мы использовали критерий Колмогорова для подтверждения нормальности распределения. Максимальное по модулю отклонение функции распределения от нормального оказалось равным  $D = 0,061$ , что дает для вероятности совпадения распределений достаточно большое значение  $P = 0,639$ . Таким образом, вероятность того, что данное распределение является нормальным, достаточно велика.

О близости плотности вероятности для нашего ряда к нормальному распределению свидетельствует и построенная гистограмма частот, приведенная на рисунке 2.

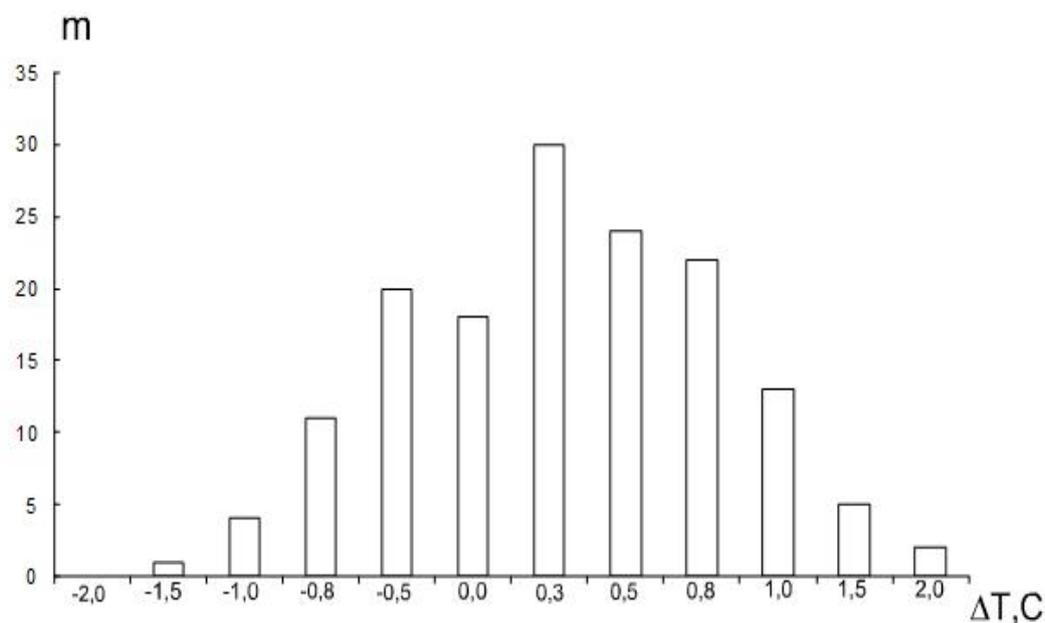


Рисунок 2 - Гистограмма частот ряда отклонений среднегодовых значений температур города Базель от линейного тренда

При оценке возможной связи между изменением температуры и индексом Североатлантического колебания мы использовали выборочный коэффициент линейной корреляции между рядом среднегодовых значений температуры с вычтенным линейным трендом и рядом среднегодовых значений индекса. Рассчитанный коэффициент линейной корреляции равен  $0,284 \pm 0,075$  и отличается от нуля на величину, превышающую  $3\sigma$ . Это отличие от нуля статистически значимо и свидетельствует о наличии линейной связи между двумя рядами. Следовательно, между изменением температуры в городе Базель и индексом Североатлантического колебания наблюдается положительная корреляционная связь.

Оценка возможной статистической связи ряда среднегодовых значений температуры с вычтенным линейным трендом и ряда значений индекса атлантической осцилляции или АМК осуществляется с использованием выборочного коэффициента линейной корреляции.

Рассчитанный коэффициент линейной корреляции составил  $0,171 \pm 0,079$  и отличается от нуля на величину, превышающую  $2\sigma$ . Это свидетельствует о наличии положительной линейной связи между двумя рядами. Следовательно, наблюдается корреляционная связь между изменением температуры в городе Базель и индексом атлантического мультидекадного колебания.

Для оценки возможной связи между изменением температуры и относительным числом солнечных пятен – числом Вольфа мы использовали выборочный коэффициент линейной корреляции между рядом среднегодовых значений температуры с вычтенным линейным трендом и рядом среднегодовых значений чисел Вольфа. Рассчитанный коэффициент линейной корреляции составил  $0,057 \pm 0,081$  и статистически значимо не отличается от нуля. Это свидетельствует о том, что простая линейная связь между данными двумя рядами отсутствует. Следовательно, корреляционной связи между изменением температуры в городе Базель и солнечной активностью не наблюдается.

Мы провели расчет автокорреляционной функции ряда среднегодовых значений температур с вычтенным линейным трендом вплоть до значения максимального сдвига  $\tau = 25$  лет. При максимальном сдвиге автокорреляционная функция не стремится к нулю, что может свидетельствовать о наличии в анализируемом ряде периодических составляющих.

Также нами использовался вариант спектрального анализа с расчетом спектра мощности  $S(f)$  путем фурье – преобразования автокорреляционной функции. При числе отсчетов ряда 150 и выбранном максимальном сдвиге автокорреляции, равным 25, ширина спектрального окна сглаженной оценки спектра  $\Delta f = 0,0267 \text{ год}^{-1}$ . Число степеней свободы равно 16, а длина 90%-го логарифмического доверительного интервала составляет 0,519. График логарифма спектра мощности в диапазоне частот  $f$  от нуля до максимальной частоты Найквиста  $0,5$ , построенный по 1001 расчетной точке, приведен на рис. 3. Вертикальным отрезком на этом рисунке показан логарифмический доверительный интервал, равный 0,519. Горизонтальным отрезком показана

ширина спектрального окна, равная 0,053, характеризующая разрешающую способность по частоте.

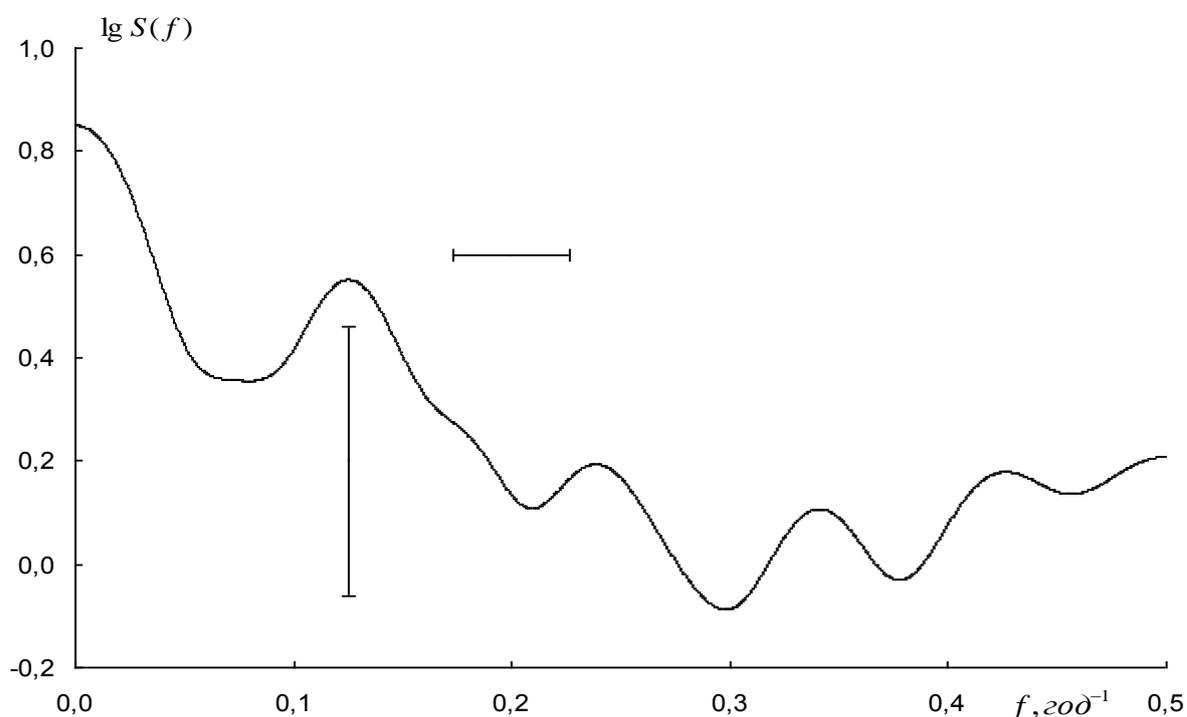


Рисунок 3 - График логарифма спектра мощности временного ряда изменения среднегодовых значений температуры Базеля

**Закключение.** Приведены основные результаты бакалаврской работы, в ходе выполнения которой была выявлена долговременная тенденция роста температур и особенностей динамики изменения этой характеристики на протяжении 150 лет. В анализируемом ряде обнаружен статистически значимый линейный тренд. За 100 лет температура города Базель повысилась на 1,35 °С. Это больше величины глобального потепления которое, по данным МГЭИК, за период 1880–2012 гг. составляет 0,85 °С.

Проверка статистической однородности ряда отклонений среднегодовых значений температуры от линейного тренда по критерию Фишера показала, что ряд можно считать статистически однородным. Значение стандартного отклонения данного ряда равно:  $\sigma = 0,645 \pm 0,037$  °С, что свидетельствует о сравнительно малом разбросе температуры относительно среднего значения.

Построенная гистограмма частот демонстрирует близость распределения к нормальному. Это подтверждают и значения асимметрии и эксцесса - они статистически значимо не отличаются от нуля. Проверка согласия распределения с нормальным по критерию Колмогорова показала, что вероятность такого совпадения близка к единице и равна 0,639. Из этого можно сделать вывод, что на изменение температуры города Базель влияет множество факторов, ни один из которых не является превалирующим.

При проведении оценки корреляционной связи между рядом аномалий температуры и индексом Североатлантического колебания значение коэффициента линейной корреляции составило  $0,284 \pm 0,075$ . Связь считается статистически значимой, так как коэффициент линейной корреляции отличается от нуля на величину  $3\sigma$ , что свидетельствует о наличии положительной линейной связи между двумя рядами.

Анализ корреляционной связи между среднегодовыми значениями температуры с вычтенным линейным трендом и рядом значений индекса Атлантического мультидекадного колебания показал наличие линейной связи. Так как значение коэффициента корреляции равно  $0,171 \pm 0,079$ , статистически значимо отличается от нуля на величину  $2\sigma$ .

В ходе анализа оценки корреляционной связи аномалий значений температур с рядом среднегодовых значений чисел Вольфа, рассчитанный коэффициент линейной корреляции имеет значение  $0,057 \pm 0,081$ . Из этого следует, что он статистически значимо не отличается от нуля и простой линейной связи между рядами не наблюдается.

Анализ автокорреляционной функции показал, что при максимальном сдвиге автокорреляционная функция не стремится к нулю. Это может свидетельствовать о наличии в анализируемом ряде периодических составляющих.

Проведенный анализ спектра мощности временного ряда среднегодовых значений температуры города Базель позволил обнаружить присутствие в нем возможных периодических составляющих. В частности, в спектре ряда был

найден пик с периодом  $2,34 \pm 0,15$  года, связанный с проявлением квазидвухлетнего цикла.