

Введение. В введении показана актуальность проблемы изменения климата. В качестве доказательства такого изменения используется рост температуры воздуха, изменение частоты и интенсивности выпадения осадков, таяние ледников и, как следствие, повышение уровня мирового океана. Есть несколько причин влияющих на изменение климата: антропогенное воздействие, космическое влияние и естественные изменения. По данным пятого доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата 2013 года за период 1880–2012 гг. наблюдается повышение средней температуры воздуха на 0,85 °С (оцененный 90% доверительный интервал составляет [0,65–1,06] °С).

Отмечено, что помимо земных процессов, влияющих на изменение климата, существуют факторы, связанные с влиянием космических воздействий. Такие как влияние изменения светимости Солнца, влияние таких объектов Солнечной системы как Луна, в том числе и такой процесс как вращение планеты вокруг своей оси. При этом для поиска влияния космических факторов может применяться статистический анализ изменения характеристик погоды и климата. Наилучшие результаты можно получить при анализе долговременных рядов метеорологических характеристик, чаще всего температуры воздуха.

Сформулированы цели бакалаврской работы:

- обзор литературы по возможному влиянию космических факторов на изменение погоды и климата и методам статистического анализа временных рядов;

- поиск возможного влияния космических факторов на тропосферные процессы, путем анализа долговременного ряда среднесуточных значений приземной температуры города Цюриха.

В первом разделе перечислены основные факторы, влияющие на изменение температуры воздуха и имеющие космическое происхождение.

Солнечная активность, обусловленная процессами циклической генерации магнитных полей на Солнце. Было установлено, что сильные магнитные бури происходят при наличии вблизи центра солнечного диска, группы темных пятен. Впоследствии удалось отметить, что это происходит не из-за самих пятен, а из-за солнечных вспышек, которые происходят в данных активных областях фотосферы.

Формируется высокотемпературная солнечная корона, ее внешняя часть расширяется, превращаясь в солнечный ветер. Солнечный ветер, обдувая магнитосферу Земли, формирует ее границы, а магнитные поля Солнца, вытягиваемые вместе с ветром к границам солнечной системы и закручиваемые при вращении Солнца, ослабляют проникновение космических лучей во внутренние области гелиосферы.

Помимо процессов, влияющих на изменение климата и связанных с деятельностью Солнца, существует процесс способный воздействовать на циркуляцию атмосферы Земли и называемый лунно-солнечным приливом. Периодические колебания уровня моря, возникающие в результате совокупного действия сил притяжения Луны и Солнца на водные массы, называются приливами (процесс повышения уровня воды) и отливами (процесс понижения уровня воды). В соответствии с законом всемирного тяготения Луна и Солнце притягивают к себе каждую частицу Земли с силой пропорциональной их массам и обратно пропорциональной квадрату расстояния между Луной (Солнцем) и данной частицей Земли.

Таким образом, приливы на Земле являются совокупными лунно-солнечными и периодически изменяются в зависимости от взаимного расположения в пространстве Луны, Солнца и Земли.

Считается, что, при практически неизменной ориентации оси вращения Земли относительно “неподвижных звезд”, фигура вращающейся Земли испытывает “покачивания” вокруг оси вращения. При этом точки пересечения оси вращения с поверхностью фигуры Земли перемещаются по

этой поверхности. Согласно принятой терминологии, это явление называют периодическим движением полюсов Земли. По результатам более чем столетних наблюдений считается, что размах “качаний” полюса по приполярной поверхности может достигать пары десятков метров.

Покачивание Земли, вызванное движением полюса, провоцирует проявление сил инерции атмосферы и океана создавая прилив с периодом движения равным движению полюса, данное явление называется полюсным приливом, характерное значение которого должно совпадать с чандлеровским периодом.

Изменение инсоляции при вращении системы Земля - Луна вокруг общего центра масс. Движение системы Земля - Луна вокруг общего центра масс барицентра приводит к наложению на эллиптическую орбиту Земли периодической составляющей с амплитудой, равной расстоянию от центра Земли до центра масс системы Земля - Луна, и периодом, равным синодическому лунному месяцу (29,53 средних солнечных суток). Помимо эффектов, связанных с возникающими при этом силами инерции. Этот процесс приводит к периодическому изменению расстояния от Земли до Солнца на 9340 км, что в среднем составляет всего 0,00624%. Но даже столь незначительное изменение расстояния влияет на существенное изменение потока солнечной энергии, падающего на Землю, т.к. он зависит от квадрата расстояния. Т.е. с изменением расстояния от Солнца до Земли происходит вариацией активности солнца.

Также в данном разделе рассматривались факторы связанные с влиянием квазидвухлетним колебанием (КДК) - одно из наиболее известных межгодовых атмосферных колебаний, чьи механизмы формирования еще не до конца выяснены. КДК – яркий пример высокочастотных квазирегулярных изменений атмосферы (и климата) Земли на межгодовых масштабах. Они создают планетарные волны и влияют на атмосферу средних широт, оказывают влияние на процессы генерации в общую циркуляцию озона и

других примесей в атмосфере, а также взаимодействуют с таким явлением как Эль-Ниньо, которое играет очень важную роль для системы Океан - Атмосфера. Имеется множество доказательств наличия КДК характеристик атмосферы Земли. Число работ, посвященных различным аспектам КДК, - изучение структуры, механизма формирования, связи с атмосферной циркуляцией, тропическим циклогенезом и т.д. – непрерывно растет. Однако многие вопросы до конца не исследованы, поэтому изучение КДК остается актуальным.

Во втором разделе даны основные определения характеристик временного ряда. Приведены основные расчетные формулы, описаны статистические методы, применяемые в обработке метеорологической информации.

В третьем разделе найденные с помощью метода наименьших квадратов значения параметров линейного тренда температуры в городе Цюрих $T_c = at + b$, оказались равными:

$$a = (2,237 \pm 0,305) \times 10^{-5} \text{ К/сутки}$$

$$b = 8,5456 \pm 0,1824 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Угловой коэффициент отличается от нуля более чем на семь стандартных отклонений. Поэтому можно считать, что в анализируемом ряде обнаружен статистически значимый линейный тренд. За 100 лет температура города Цюрих повысилась на величину $0,817 \pm 0,111$ К. Это приблизительно соответствует средней величине глобального потепления, которое, по данным МГЭИК, за период 1880–2012 гг. составляет $0,85$ °С

Для дальнейшего анализа данного ряда температур были устранены сезонные изменения. Найденные значения амплитуды A и начальной фазы φ для синусоиды с периодом тропического года $P_0 = 365,2422$ суток и его первой гармоники с периодом $182,6211$ суток. Построен график аномалий среднесуточных значений температуры воздуха с вычтенным линейным тендом связанный с глобальным потеплением, и сезонные гармоники.

Отфильтрованный таким образом ряд данных не содержит сезонных изменений.

Оценка основных статистических характеристик ряда отклонений температуры от сезонного хода. Она характеризует отличие распределения от нормального. Для оценки характера распределения была построена гистограмма частот рисунок 1.

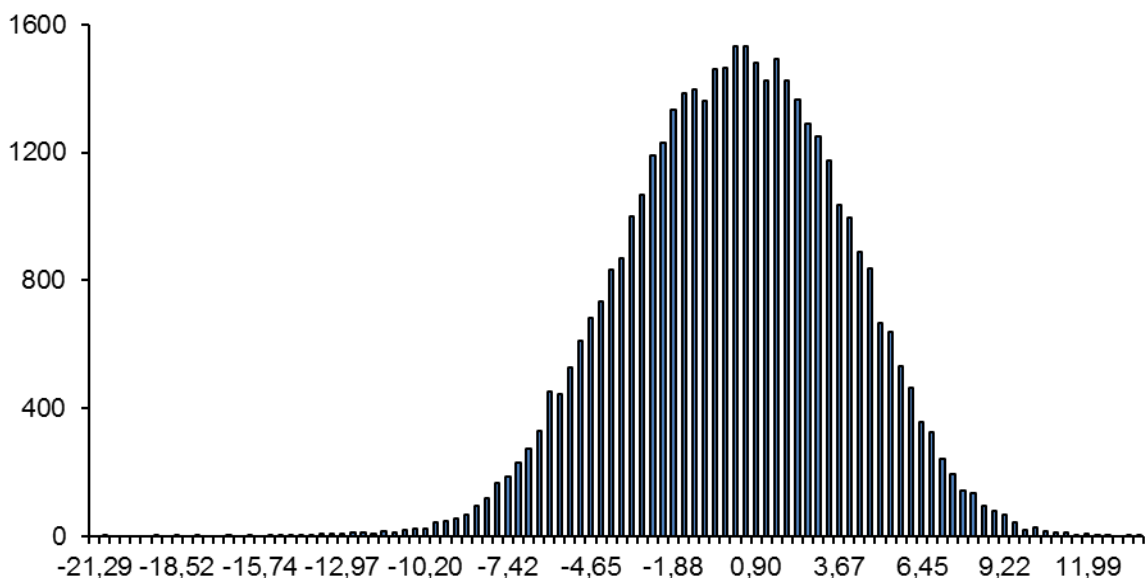


Рисунок 1 - Гистограмма частот аномалий среднесуточных значений температуры воздуха города Цюрих с вычтенным линейным тендом и сезонными гармониками (составлено автором)

Анализируя гистограмму можно увидеть, что значений отрицательных температур больше. Это говорит о том, что за рассматриваемый период в городе Цюрих в изменении среднесуточных значений температуры преобладали похолодания. В ходе анализа ряда были найдены следующие значения основных статистических характеристик:

Для проверки на статистическую однородность ряда мы разделили его на две равные части. Мы проанализировали каждую из выборок, рассчитав для них стандартные отклонения и получили следующие значения:

$$\sigma_1 = 3,669 \pm 0,018 \text{ К}$$

$$\sigma_2 = 3,713 \pm 0,018 \text{ К}$$

Рассчитанное значение критерия Фишера равно

$$F = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right)^2 = 1,024$$

В нашей работе мы использовали критерий Колмогорова для подтверждения нормальности распределения. Максимальное по модулю отклонение функции распределения от нормального оказалось равным $D = 0,01327$, что дает для вероятности совпадения распределений достаточно малое значение, не превышающее 10^{-6} .

Мы провели расчет автокорреляционной функции ряда среднесуточных значений температур с вычтенным линейным трендом и сезонными гармониками вплоть до значения максимального сдвига $\tau = 5000$ суток. Часть графика этой функции показана на рисунке 3.4. При больших сдвигах автокорреляционная функция не стремится к нулю, что может свидетельствовать о наличии в анализируемом ряде периодических составляющих.

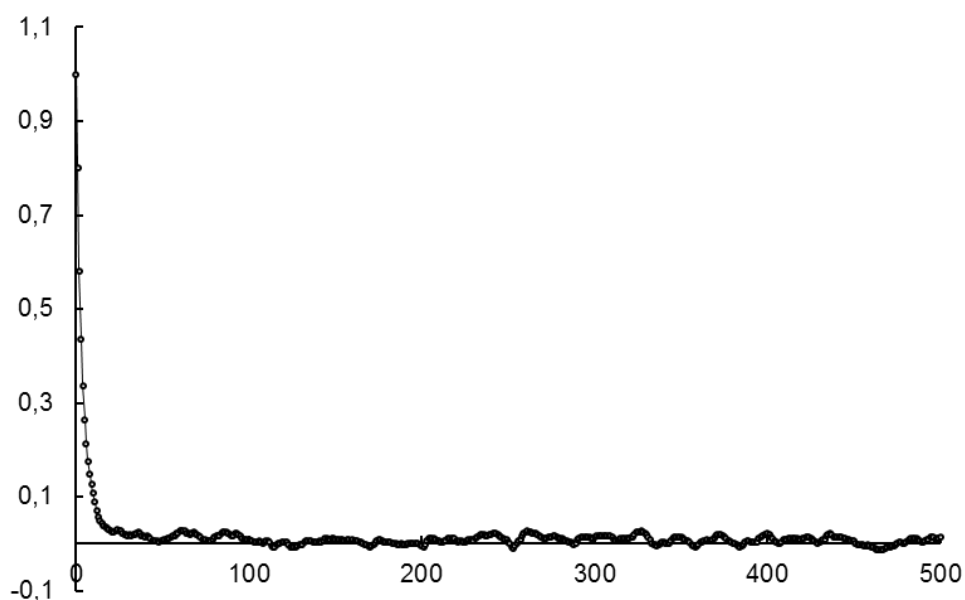


Рисунок 2 – Автокорреляционная функция временного ряда среднесуточных значений аномалий температур с вычтенными сезонными изменениями (составлено автором)

Следующим этапом является проведение спектрального анализа - расчета спектров мощности с применением классического варианта спектрального анализа с использованием фурье - преобразования автокорреляционной функции.

При числе отсчетов ряда 41638 и выбранном максимальном сдвиге автокорреляции, равным 5000, ширина полосы частот спектрального окна Ханна, характеризующая разрешающую способность по частоте, составляет

$$\Delta f = 2,667 \times 10^{-4} \text{сут}^{-1},$$

число степеней свободы сглаженных оценок спектров равно 20, а длина 90%-го доверительного интервала для математического ожидания в логарифмическом масштабе равна 0,44.

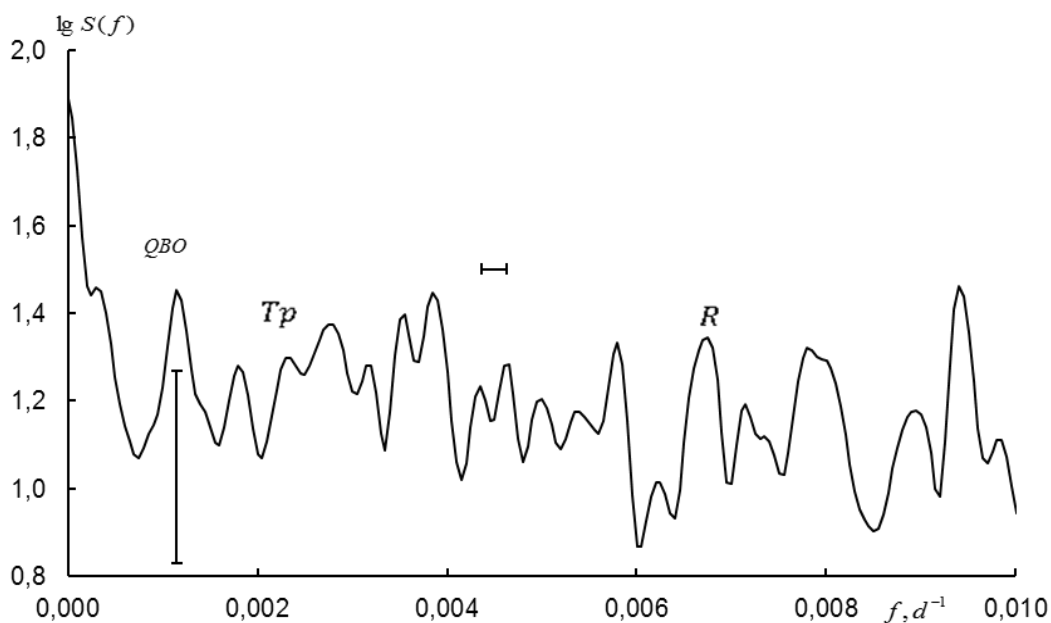


Рисунок 3 - Спектр мощности временного ряда значений среднесуточной температуры в г.Цюрих с вычтенными сезонными

изменениями, в области периодов превышающих 100 суток. С.К.О. ряда из 41638 отсчетов равно 3.693 К. (составлено автором)

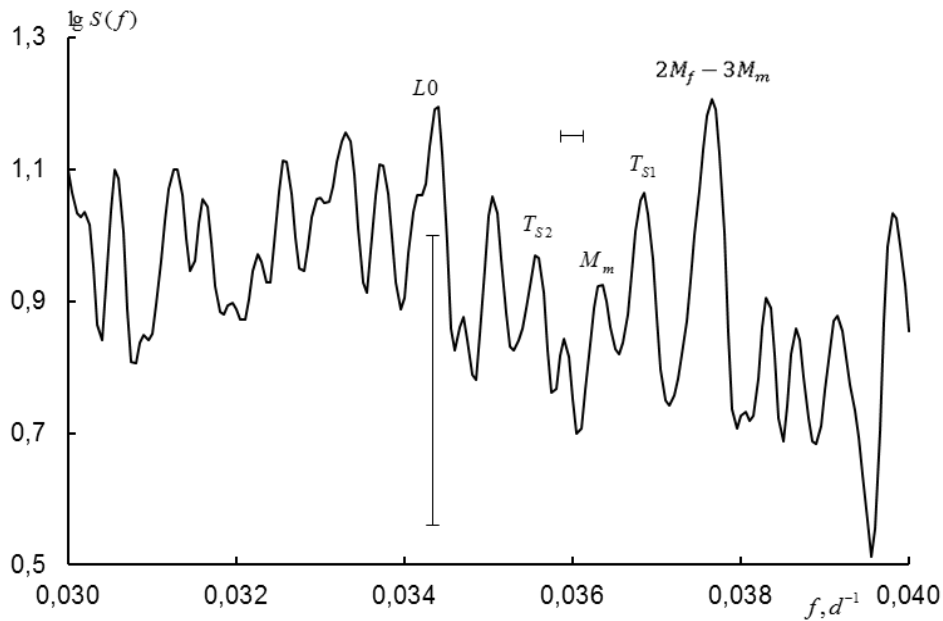


Рисунок 3.6 - Спектр мощности значений среднесуточной температуры в г.Цюрих с вычтенными сезонными изменениями с периодом около месяца (составлено автором).

На данном графике видна гармоника $TS1$, совпадающая с синодическим периодом вращения Солнца, обусловленная наличием активных областей и корональных дыр, существующих в течение нескольких солнечных оборотов. Гармоника с обозначением $Ts2$ обнаружена при исследовании изменений солнечных фотосферных магнитных полей и межпланетного магнитного поля.

Гармоника с периодом синодического месяца Луны $L0$ также присутствует в спектрах аномалий температуры. Ее причиной является изменение инсоляции при вращении системы Земля - Луна вокруг общего центра масс. Обнаружены также гармоники, связанные с солнечно-лунными приливами: с месячным периодом M_m и гармоника комбинационной частоты $2M_f - 3M_m$.

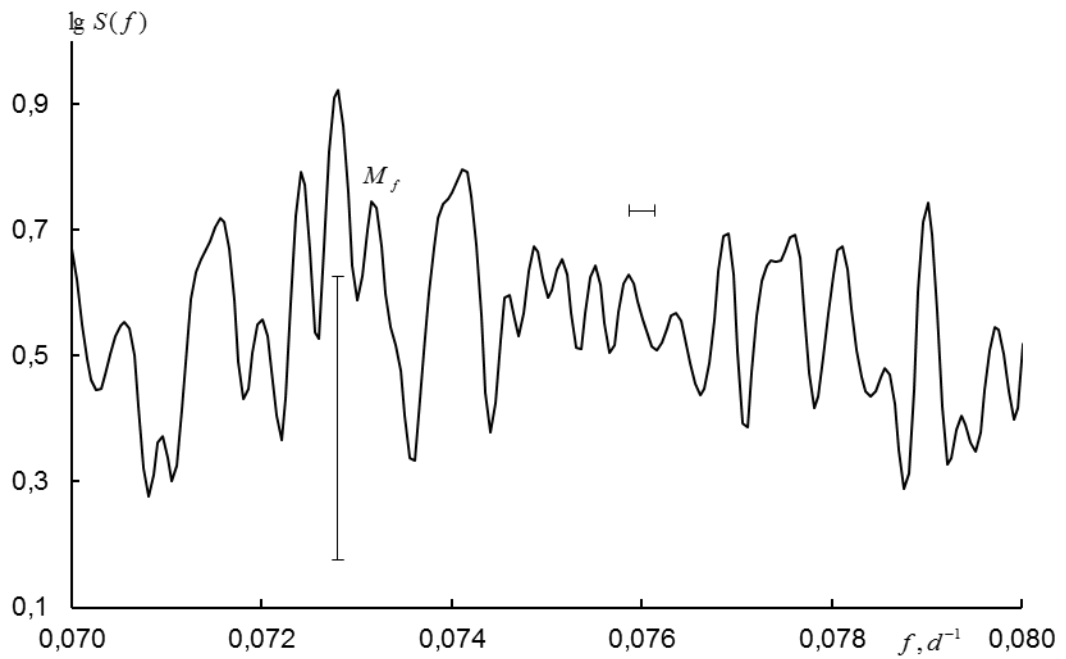


Рисунок 5 – Спектр мощности значений среднесуточной температуры в г.Цюрих с вычтенными сезонными изменениями в области гармоник с периодами около двух недель (составлено автором).

На данном графике присутствует влияние полумесячная приливная M_f .

Значения данных периодов различных гармоник и сравнение полученных значений с точными значениями периодов изменения космических факторов приведены в таблице

Таблица 1 – Периоды гармоник, обнаруженных в спектре мощности временного ряда аномалий приземной температуры воздуха на метеостанции Базель, и их идентификация (составлено автором)

Номер гармоники	Период (сутки)	Точное значение периода, сутки	Идентификация
1	869 ± 200	870	QBO
2	435 ± 51	433	Tr
3	$148,1 \pm 5,8$	154	R
4	$29,12 \pm 0,23$	29,53	L0
5	$28,49 \pm 0,22$	28,30	TS2
6	$27,82 \pm 0,21$	27,55	M _m
7	$27,17 \pm 0,20$	27,03	TS1
8	$26,53 \pm 0,19$	26,65	2M _f – 3M _m
9	$13,67 \pm 0,05$	13,66	M _f

В заключении кратко изложены основные полученные результаты. В ходе статистического анализа долговременного ряда среднесуточных температур выяснилось, что за 100 лет температура города Цюрих повысилась на 0.817 ± 0.111 К. Это приблизительно равно величине глобального потепления которое, по данным МГЭИК, за период 1880–2012 гг. составляет 0.85 °С.

Проведенный анализ спектра мощности показывает наличие влияния на изменение температуры атмосферы в городе Цюрих двух геофизических факторов: квазидвухлетнего цикла *QBO* и полюсного прилива *Tr*. Также

найденны гармоникн, связаннне с солнечной активностью. Гармоника R с периодом ригеровского цикла продолжительностью 154 сут. Гармоника $TS1$, совпадающая с синодическим периодом вращения Солнца. Гармоника $Ts2$ обнаруженная при исследовании изменений солнечных фотосферных магнитных полей и межпланетного магнитного поля.

Гармоника с периодом синодического месяца Луны $L0$ также присутствует в спектрах аномалий температуры. Ее причиной является изменение инсоляции при вращении системы Земля - Луна вокруг общего центра масс.

Обнаружены гармоникн, связаннне с солнечно-лунными приливами, в том числе полумесячная Mf и месячная Mm гармоникн и гармоника комбинационной частоты $2M_f - 3M_m$.

Проведенный анализ показывает, что космические факторы воздействуют на процессы, происходящие в тропосфере и приводящие к изменению погоды и климата на нашей планете.