

# Следы солнечной активности в температурных рядах

Самородова Екатерина

28 июля 2020 г.

## Содержание

<b>1</b>	<b>Данные</b>	<b>1</b>
1.1	Солнечные данные . . . . .	1
1.2	Температурные данные . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Метод</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Результаты</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Статистическая проверка</b>	<b>6</b>

## 1 Данные

В данной работе используются данные об уровне солнечной активности и значениях температуры, зафиксированных на пяти метеостанциях Европы в период с 1818 года и по настоящее время. В данном случае под уровнем солнечной активности подразумевается ежедневное количество солнечных пятен (ISSN), которое исследуется на наличие корреляции со значением температуры.

### 1.1 Солнечные данные

В качестве данных о солнечной активности используется ежедневное количество солнечных пятен, зафиксированных Королевской обсерваторией Брюсселя с 1818/01/01 по настоящее время [3]. Более ранние записи о количестве пятен Вольфа не представлены по причине наличия в них большого количества пропусков и неточностей. Используемые данные находятся в свободном доступе: <http://www.sidc.be/silso/datafiles>, Total Sunspot Number, Daily total sunspot number. Каждая строка, соответствующая записи о данных, содержит 7 (в некоторых случаях 8) элементов:

- 1-3 Год, месяц и день, соответствующий записи о данных
- 4 Дата в формате тысячных долей прошедшего года (например, 1818.001 соответствует 1 января 1818, а 1818.999 — 31 декабря 1818)

- 5 Общее среднее количество солнечных пятен, зафиксированных в этот день
- 6 Стандартное отклонение, вычисленное по набору значений, полученных в этот день с различных станций
- 7 Количество станций, по наблюдениям которых было вычислено среднее количество солнечных пятен в данный день
- 8 Показатель того, является ли найденное значение окончательным — пустая колонка означает, что значение окончательно, наличие символа “\*” показывает, что указанное количество солнечных пятен является предварительным и может быть пересмотрено (обычно этот символ встречается в записях, сделанных не ранее 3-6 месяцев от сегодняшнего дня)

В данном исследовании используется набор значений пятой колонки данного файла, а точнее количество солнечных пятен, зафиксированных в даты, которые не являются 29-ым февраля и в которые были получены значения хотя бы с одной станций.

Так, в качестве предобработки из данных о солнечной активности были удалены пропуски и записи о 29-х февраля, как того требует дальнейший алгоритм обработки данных. После чего солнечные данные были осреднены по четырем годам — так, дате  $D$  будет соответствовать среднее количество солнечных пятен, зафиксированных не ранее двух лет до  $D$  и не позднее двух лет после  $D$ . Таким образом, теперь данные о солнечной активности содержат записи от 1820 года по 2017 включительно. Полученная функция зависимости осредненного количества солнечных пятен от времени представлена на графике [1]. По заданным значениям были найдены границы солнечных циклов — дни с минимальным осредненным количеством солнечных пятен, что стало возможным благодаря сглаживанию функции. При этом средняя длина промежутков между минимумами сглаженной солнечной активности составляет около 10.89 лет, что соответствует 11-летним солнечным циклам в исходных данных.

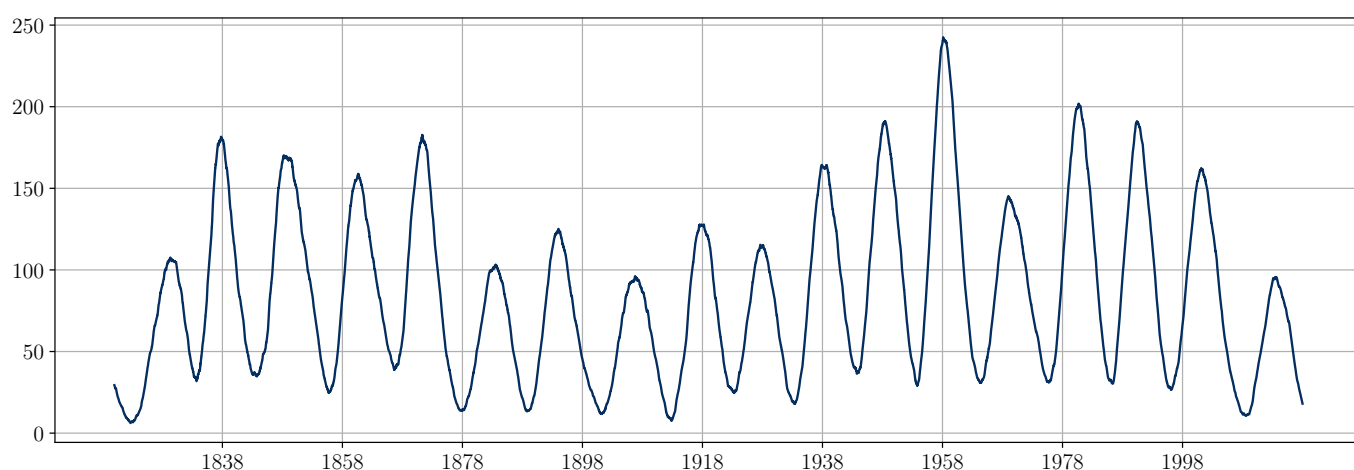


Рис. 1: Сглаженное по 4 годам ежедневное значение ISSN

## 1.2 Температурные данные

В данной работе исследуются температурные значения, зафиксированные в пяти городах Европы — Болонье (Италия), Милане (Италия), Юкеле (часть Брюсселя, Бельгия), Праге (Чехия) и Йене (Германия). Три из этих пяти городов (Болонья, Прага и Юкель) были уже исследованы ранее в работах В.Коссобоковым, J.-L. Le Mouél и другими [4], [5]. Данные этих пяти станций были выбраны как наиболее длинные непрерывные серии температурных значений, зафиксированных в Европе, за исключением данных Оксфорда, которые не были исследованы по причине географической удаленности и серьезных климатических различий. В данном случае исследуются как средние ежедневные значения температуры (TG), так и экстремальные минимальные (TN) и максимальные (TX), зафиксированные в базе данных European Climate Assessment & Dataset: <https://www.ecad.eu/dailydata/predefinedseries.php>, Non-Blended ECA Dataset [2].

- Болонья: Bologna, TN SQUID 100548 (1814/01/01..2003/12/31),  
TG SQUID 100862 (1814/01/01..2003/12/31), TX SQUID 100549 (1814/01/01..2003/12/31)
- Прага: Praha-Klementium, TN SQUID 100079 (1775/01/01..2005/04/30),  
TG SQUID 100080 (1775/01/01..2020/03/31), TX SQUID 100081 (1775/01/01..2005/04/30)
- Юкель: Uccle, TN SQUID 117881 (1833/01/02..2011/01/23),  
TX SQUID 117882 (1833/01/02..2011/01/23), данных о средней температуре (TG) нет
- Милан: Milan, TN SQUID 105247 (1763/01/01..2008/11/30),  
TG SQUID 105249 (1763/01/01..2008/11/30), TX SQUID 105248 (1763/01/01..2008/11/30)
- Йена: Jena Sternwarte, TN SQUID 100171 (1824/01/01..2020/04/30),  
TG SQUID 100172 (1824/01/01..2020/04/30), TX SQUID 100173 (1824/01/01..2020/04/30)

Каждый файл имеет следующую структуру из 5 колонок, содержащих информацию о соответствующей станции и полученных наблюдениях:

1. Уникальный идентификационный номер станции (STAID, station id)
2. Уникальный номер источника (SQUID, source id)
3. Дата наблюдения в формате YYYYMMDD
4. Зафиксированное значение температуры в 0.1°C (TN, TG или TX в зависимости от источника) — так, записанное в этой колонке значение -105 соответствует наблюдаемой температуре в -10.5°C. Это означает, что погрешность наблюдений составляет порядка 0.05°C.
5. Показатель, является ли значение валидным (0), ожидаемым (1) или отсутствующим (9).

Для дальнейшей обработки из исходных файлов были выбраны значения третьей колонки и четвертой, разделенные на 10, чтобы единицы измерения соответствовали градусам, — зафиксированные значения температуры при условии, что значения не отсутствуют и соответствуют любой дате, кроме 29-го февраля какого-либо високосного года. После этого из каждого значения было вычтено среднее значение температуры в соответствующей серии для того, чтобы новое среднее соответствовало нулю. Так, из минимальной температуры, зафиксированной в 1999/01/01 в Праге, было вычтено среднее арифметическое среди минимальных температур, зафиксированных в Праге за весь период наблюдения. Пусть полученная функция температуры от времени будет обозначаться как  $T[date]$

В зависимости от того, каким годом датируется начало записей о зафиксированных температурах, исследуемые серии данных могут быть обрезаны в том случае, если они начинаются раньше серии солнечных данных, т.к. в дальнейшем исследуется зависимость между температурой и сглаженным количеством солнечных пятен, зафиксированных в один период времени. Таким образом были учтены данные Праги и Милана начиная с 1820 года.

## 2 Метод

Цель обработки данных заключается в нахождении связей между солнечными и температурными данными. Для этого с помощью модификации алгоритма наложенных эпох находится средняя разница температур между периодами высокого и низкого уровня солнечной активности. Ожидается, что эта разница окажется положительной, в этом случае можно будет говорить о повышении температуры в городах Европы в эпоху высокой солнечной активности.

Так, для обработки было выбрано 11-летнее скользящее окно, благодаря чему общее явление повышения температуры, наблюдаемое в XXI веке, не оказывает влияния на итоговый результат, в отличие от исследования 2010-го года [1], в котором к эпохе высокой солнечной активности были отнесены последние 6 солнечных циклов. Внутри каждого окна производилось разделение на периоды разного уровня солнечной активности: так, если в день  $D$  сглаженное количество солнечных пятен меньше  $M$ , где  $M$  — это медиана сглаженной солнечной активности по всему текущему окну, то  $D$  относится к периоду низкой солнечной активности, иначе — к периоду высокой активности. Это приводит к тому, что данные периоды оказываются одинакового размера. После этого в текущем окне находится разница между температурами, зафиксированными во время разного уровня солнечной активности, по следующему алгоритму:

Для каждой даты  $date$  внутри текущего скользящего окна находится соответствующий уровень солнечной активности (высокой или низкой), а также номер дня  $N$  с начала года, которому соответствует дата — так, 1818/01/01 соответствует  $N = 1$ , а 2000/03/01 —  $N = 60$ , т.к. считается, что в феврале всегда 28 дней — именно для этого единообразия сопоставления даты и количества дней с начала года из данных были предварительно удалены записи о 29-х февраля. Температурные данные текущего окна собираются в два больших набора, отличающихся по уровню солнечной активности. Внутри каждого из этих двух наборов происходит более мелкое деление, соответствующее номеру дня года, т.е. в каждый момент времени обра-

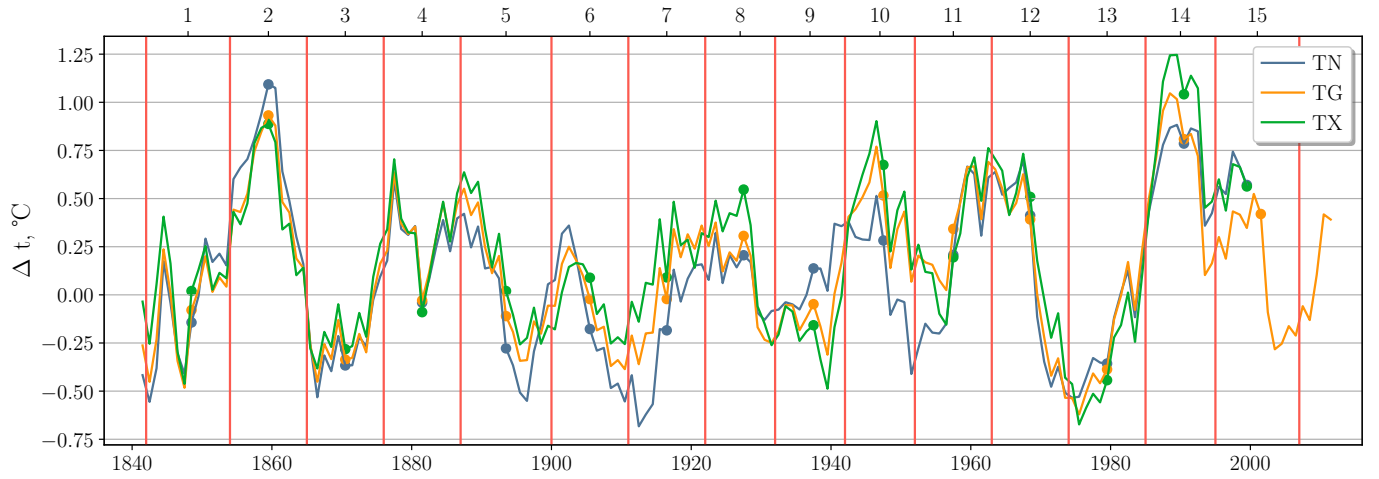


Рис. 2: Средняя арифметическая разница температур в Праге. Розовым выделены минимумы солнечных циклов, между минимумами подписан номер соответствующего цикла, также выделены точки посередине каждого цикла. TN, TG и TX — минимальные, средние и максимальные ежедневные температуры соответственно.

ботки одного одиннадцатилетнего окна хранятся два двумерных массива чисел  $L[N]$  (низкий уровень солнечной активности) и  $H[N]$  (высокий уровень солнечной активности), содержащие по 365 ( $N = 1 \dots 365$ ) наборов чисел. Так, если дате  $date$  соответствует температура  $T[date]$  и, например, низкий уровень солнечной активности, т.е. сглаженное количество солнечных пятен в этот день оказалось ниже медианного значения по этому отрезку времени, то значение  $T[date]$  добавляется в выборку  $L[N]$ , а также в выборки, соответствующие двум дням года до и после  $N$  — т.е. в выборки массива  $L$  под номерами  $N - 2 \dots N + 2$ . В данном случае предполагается, что номера дней с начала года зациклены, т.е. значение температуры для 31 декабря, когда был зафиксирован высокий уровень солнечной активности, добавляется в выборки  $H[363], H[364], H[365], H[1], H[2]$ .

Таким образом, после добавления данных всего скользящего окна при условии отсутствия пропусков в данных каждый из массивов  $L, H$  имеет размер около  $365 \times 27$ , т.е. в среднем около  $11 \cdot 5/2$  значений в каждой из подвыборок — для каждого дня года  $N$  есть всего не более 11 значений температуры, зафиксированных в этот день года, каждое из которых попадает в один из двух уровней солнечной активности. Затем внутри каждой из подвыборок находится среднее арифметическое значение, после чего остается два массива по 365 значений осредненной температуры, зафиксированных в тот или иной день с начала года в периоды высокой и низкой солнечной активности. Для того, чтобы найти среднюю разницу температур внутри заданного одиннадцатилетнего окна, значения средних температур в различные дни года поэлементно вычитаются: так, разнице средних температур в день под номером  $N$  соответствует значение  $\text{mean}(H[N]) - \text{mean}(L[N])$ . Среди оставшихся 365 значений разницы температур по дням года находится среднее арифметическое (медиана), после чего найденное значение  $T_d$  сопоставляется с датой посередине текущего окна. Полученные результаты для минимальных температур, зафиксированных в Праге, — средняя разница температур между периодами высокого и низкого уровня солнечной активности — можно видеть на графике [2].

Таблица 1: Средние значения медианной и средней арифметической разницы температур

	minimum	average	maximum		minimum	average	maximum
Bologna	0.1568	0.0744	-0.0144	Bologna	0.1424	0.0620	-0.0183
Prague	0.0925	0.1249	0.1758	Prague	0.1033	0.1318	0.1932
Uccle	0.1186	—	0.1840	Uccle	0.1382	—	0.1989
Milan	-0.0344	-0.0161	0.0069	Milan	-0.0556	-0.0202	0.0151
Jena	0.1795	0.1999	0.2539	Jena	0.2224	0.2317	0.2636

### 3 Результаты

Полученные внутри одного города графики достаточно сильно коррелируют, что подтверждает устойчивость описанного метода. Для разных городов найденные функции заметно различаются, однако имеют несколько сходств: например, во 2-ом солнечном цикле все графики показывают явный цикл с максимумом в середине солнечного цикла, а в 4-ом, 7-ом и на границе 12-13 солнечных циклов находится заметный провал. Также в 14-м цикле разницы максимальных температур (ТХ) показывают схожий положительный цикл во всех городах, кроме Милана.

При этом важно посмотреть на средние значения вдоль каждого графика, представленные в таблице [1]. Средняя разница температур достигает нескольких десятых градуса в случае Праги, Юкеля и Йены, а в Болонье и Милане найденная разница меньше и составляет от -0.0202 до 0.1568 в отличие от 0.0925...0.2636 в случае предыдущих трех городов.

Для того, чтобы оценить, отличается ли статистически найденная средняя разница температур от нуля, необходимо провести дополнительные тесты со случайным разделением на периоды высокой и низкой солнечной активности.

### 4 Статистическая проверка

Идея теста заключается в том, чтобы уменьшить влияния непосредственной корреляции между температурой и уровнем солнечной активности, зафиксированными в один период времени. Для этого перед проведением теста года внутри каждого солнечного цикла были перемешаны. Так, если солнечный цикл состоит находится в промежутке [1999/05/05, 2010/10/03), то года с 1999 по 2009 включительно были перемешаны в случайном порядке, и дата date теперь соответствует некоторая другая дата  $\text{shift}[\text{date}]$  с разницей не более чем в 11 лет в любую сторону. После этого повторяется описанный выше алгоритм с некоторыми изменениями: внутри каждого одиннадцатилетнего окна происходит деление на два периода активности — по медиане сглаженных солнечных пятен, соответствующих сдвинутым датам. Так, если дню  $D$  соответствует дата  $\text{shift}[D]$  с количеством солнечных пятен, не превосходящим медианного  $M$ , то  $D$  относится в периоду низкого уровня солнечной активности. После этого температура  $T[\text{shift}[D]]$ , зафиксированная в день  $\text{shift}[D]$ , добавляется в 5 выборок по номеру дня года  $N$ , соответствующих низкой солнечной активности:  $L[N - 2]$ ,  $L[N - 1]$ ,  $L[N]$ ,  $L[N + 1]$ ,  $L[N + 2]$ . После того, как будут обработаны все даты внутри текущего скользящего окна, найденное ме-

Таблица 2: Количество медианных (средних) значений разниц температур, полученных в результате 100 тестов, не превышающих наблюдаемые значения разницы температур

city	case	real median	% less	city	case	real mean	% less
Bologna	min	0.1568	98	Bologna	min	0.1424	96
Bologna	avg	0.0744	84	Bologna	avg	0.0620	72
Bologna	max	-0.0144	42	Bologna	max	-0.0183	34
Prague	min	0.0925	89	Prague	min	0.1033	84
Prague	avg	0.1249	86	Prague	avg	0.1318	85
Prague	max	0.1758	91	Prague	max	0.1932	99
Uccle	min	0.1186	90	Uccle	min	0.1382	96
Uccle	max	0.1840	96	Uccle	max	0.1989	95
Milan	min	-0.0344	36	Milan	min	-0.0556	23
Milan	avg	-0.0161	40	Milan	avg	-0.0202	30
Milan	max	0.0069	63	Milan	max	0.0151	63
Jena	min	0.1795	98	Jena	min	0.2224	92
Jena	avg	0.1999	95	Jena	avg	0.0.2317	98
Jena	max	0.2539	100	Jena	max	0.2636	100

дианное (среднее арифметическое) значение разницы температур ставится в соответствие дате посередине окна, аналогично исходному алгоритму. Итогом одного теста является данный массив значений средней разницы между температурами, зафиксированными в периоды высокой и низкой солнечной активности.

Всего проводится 100 таких тестов для каждой серии данных. Полученные двумерные массивы, каждая строка которого соответствует результатам одного теста, используются для дальнейшей обработки. Так, для сравнения полученных по итогам тестирования результатов с наблюдаемыми разницами температур были найдены средние арифметические значения вдоль каждого из тестов. После чего для каждой серии данных было подсчитано количество тестов, средние значения которых не превосходят реальные средние значения. Полученный процент тестов (количество тестов равно процентам, т.к. всего было проведено 100 тестов) указан в таблице [2].

Для визуального сравнения полученных кривых несколько графиков, полученных по итогам проведения тестов с перемешиванием годов внутри солнечных циклов, будут изображены вместе с исходным графиком для реальных разностей температур. Для этого были выбраны средние по некоторым параметрам результаты тестов. Так, пусть в день  $D$  была зафиксирована минимальная реальная разница между температурами, и этой дате соответствует 100 тестовых значений. Был выбран тест, соответствующий медианному значению, полученному в день минимальной разницы, а также аналогичный медианный тест для максимума разницы температур. Кроме того, помимо отдельных тестов на график были помещены значения, полученные после вычисления среднего арифметического в каждой точке по 100 тестовым значениям. Полученные реальные и тестовые графики [3] визуально очень схожи, у них практически совпадает амплитуда. При этом средние тестовые значения (розовая линия) практически нулевые, что подтверждает корректность проведенных тестов.

Несмотря на внешнюю схожесть полученных графиков, в трех из пяти городов реальные на-

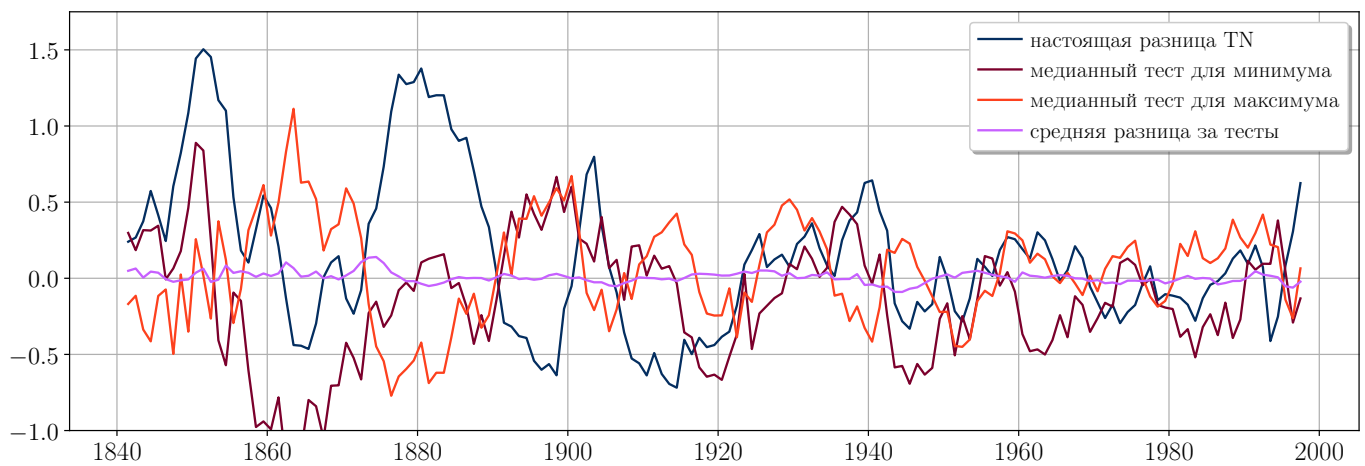


Рис. 3: Результаты теста для минимальных температур в Болонье: Средняя разница температур (синий), значения тестов для медианных значений минимума и максимума исходной функции (бордовый и оранжевый), среднее значение за 100 тестов (розовый).

блюдаемые значения превышают большинство средних тестовых значений — это Юкель, Прага и Йена, в которых наблюдаемые значения оказались больше 78-99% тестовых [2]. Значения в Болонье и Милане близки к медианным результатам тестов и превосходят около 30-70% значений, что не позволяет говорить о наличии положительной разницы температур в данных двух городах.



## Список литературы

- [1] V. Courtillot J.-L. Le Mouél, V. Kossobokov. A solar pattern in the longest temperature series from three stations in Europe. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 72(1):62–76, 2010.
- [2] European Climate Assessment & Dataset project. Non-blended ECA dataset. <https://www.ecad.eu/dailydata/predefinedseries.php>, 2018.
- [3] Brussels Royal Observatory of Belgium. Total sunspot number. Daily total sunspot number. <http://www.sidc.be/silso/datafiles>.
- [4] V. Courtillot V. Kossobokov, J.-L. Le Mouél. A statistically significant signature of multi-decadal solar activity changes in atmospheric temperatures at three european stations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 72, 2010.
- [5] V. Courtillot V. Kossobokov, J.-L. Le Mouél. On the diversity of long-term temperature responses to varying levels of solar activity at ten european observatories. *Atmospheric and Climate Sciences*, 9, 2019.