

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Барляева Татьяна Вячеславовна

СОЛНЕЧНЫЙ И ВУЛКАНИЧЕСКИЙ  
СИГНАЛЫ  
В ДЕКАДНЫХ ВАРИАЦИЯХ КЛИМАТА  
ЗЕМЛИ

01.03.03. — Физика Солнца

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук  
Д.И.Понявин

Санкт-Петербург – 2009

# Оглавление

<b>Введение</b>	<b>5</b>
<b>1 Методология</b>	<b>18</b>
1.1 Вейвлет анализ и вейвлет кросс-когерентность . . . . .	19
1.2 Метод разложения по эмпирическим модам (Empirical Mode Decomposition, EMD) . . . . .	37
<b>2 Вариации климата</b>	<b>43</b>
2.1 Введение к Главе 2 . . . . .	43
2.1.1 Исследования колебаний климата и возможности их обу- словленности внешними причинами . . . . .	43
2.1.2 Климатические циклы и их возможные причины . . . . .	49
2.1.3 Климатические изменения во второй половине XX века, глобальное потепление и его возможные причины . . . . .	54
2.2 Глобальная температура . . . . .	59
2.2.1 Экспериментальные данные . . . . .	60
2.2.2 Методология . . . . .	63
2.2.3 Обсуждение результатов . . . . .	64
2.3 Выводы к Главе 2 . . . . .	78
<b>3 Солнечная, геомагнитная и вулканическая активность</b>	<b>80</b>
3.1 Введение к Главе 3 . . . . .	80
3.1.1 Солнечная активность . . . . .	80
3.1.2 Геомагнитная активность . . . . .	81
3.1.3 Вулканическая активность . . . . .	81
3.2 Экспериментальные данные . . . . .	82
3.2.1 Солнечная активность . . . . .	82
3.2.2 Геомагнитная активность . . . . .	83
3.2.3 Вулканическая активность . . . . .	85
3.3 Методология . . . . .	90

3.4	Обсуждение результатов . . . . .	90
3.4.1	Солнечная активность . . . . .	90
3.4.2	Геомагнитная активность . . . . .	92
3.4.3	Когерентность солнечной и геомагнитной активности . . . . .	92
3.4.4	Вулканическая активность . . . . .	95
3.4.5	Когерентность солнечной и вулканической активности . . . . .	95
3.5	Выводы к Главе 3 . . . . .	103
<b>4</b>	<b>Солнечная, геомагнитная, вулканическая активность и глобальные изменения климата на 11- и 22-летних масштабах</b>	<b>106</b>
4.1	Введение к Главе 4 . . . . .	106
4.1.1	История исследования возможного воздействия вариаций солнечной активности на климат Земли . . . . .	107
4.1.2	Вариации солнечной активности и приземная температура. Возможные механизмы воздействия . . . . .	120
4.1.3	Вулканическая активность и её последствия в атмосфере и климате Земли . . . . .	121
4.2	Экспериментальные данные . . . . .	129
4.3	Методология . . . . .	129
4.4	Обсуждение результатов . . . . .	129
4.4.1	Солнечная и вулканическая активность: комбинированное воздействие на климат Земли, как возможная причина квази-11-летней периодичности в рядах климатических данных конца XX столетия . . . . .	130
4.4.2	Квази-22-летняя периодичность в когерентности солнечной активности с вариациями глобальной температуры . . . . .	146
4.4.3	Геомагнитная активность и глобальная температура . . . . .	147
4.5	Выводы к Главе 4 . . . . .	149
<b>5</b>	<b>Географическое распределение регионов, где наблюдаются периодичности. Чувствительность к внешним воздействиям различных климатических зон. Группы регионов со сходным поведением</b>	<b>152</b>
5.1	Введение к Главе 5 . . . . .	153
5.1.1	Географические зоны, в которых климатические изменения выражены наиболее ярко . . . . .	155
5.1.2	Приповерхностная температура воздуха и 11-летний солнечный цикл Швабе . . . . .	155

5.2	Экспериментальные данные . . . . .	157
5.3	Методология . . . . .	161
5.4	Обсуждение результатов . . . . .	164
5.4.1	Цикличности в климате . . . . .	164
5.4.2	Отклики климата на внешние воздействия: квази-11-летняя периодичность . . . . .	166
5.4.3	Отклики климата на внешние воздействия: квази-22-летняя периодичность . . . . .	173
5.4.4	Статистика наблюдаемых вейвлет-кросс-когерентностей внешних факторов и температуры на 11- и 22-летней периодичности для анализируемой сети метеорологиче- ских станций . . . . .	175
5.4.5	“Чувствительные” к внешним воздействиям климатиче- ские зоны . . . . .	184
5.5	Выводы к Главе 5 . . . . .	184
	<b>Заключение</b>	<b>187</b>
	<b>Литература</b>	<b>193</b>

# Введение

Основная проблема, обсуждаемая в данной диссертации, состоит в реальности декадных вариаций, наблюдаемых некоторыми авторами в климатических данных, а также в поиске причин, которыми эти вариации могут быть вызваны. Вопрос возникает уже на стадии поиска непосредственно 11- и 22-летнего сигналов в климатических данных. Некоторые авторы находят такие сигналы в данных, другие же — нет. Но даже те, кто таковые сигналы обнаруживает, дают различные объяснения их природы. Кто-то из исследователей придерживаются точки зрения существования внешнего (внешних) фактора (факторов), ответственных за наличие таких сигналов в климате, кто-то же считает, что наблюдаемые сигналы имеют чисто климатическое происхождение, не связанное с воздействием на климат каких-либо внешних причин. Объяснением такой противоречивости получаемых результатов могут служить несколько моментов:

- декадные вариации в климате изменяются во времени, то появляясь, то исчезая по каким-либо причинам;
- декадные вариации климата могут иметь место не во всех климатических зонах;
- методы, применяемые разными авторами, далеко не всегда годятся для исследуемого ряда на рассматриваемом интервале времени.

Например, если исходить из предположения, что проявление в климате декадной вариации имеет временное распределение, то применение линейных методов к рядам, покрывающим интервалы с проявляющейся декадной вариацией и без неё, в среднем даст результат, говорящий либо об отсутствии сигнала, либо о том, что он очень слабый. А исследование отдельно взятых климатических рядов из различных географических зон может привести к противоположным результатам ввиду того, что имеет место и пространственное распределение, то есть в каких-то регионах планеты декадная вариация

в климате есть, а в каких-то — нет. Таким образом, имеет место сильная нестабильность, нелинейность проявления декадных вариаций в климате.

Что касается причин декадной вариации в климате, то само значение длины периода наталкивает на предположение, что возможным внешним фактором, обуславливающим наблюдаемые в климате декадные вариации, является солнечная активность. Однако, как известно, декадные вариации солнечной активности носят достаточно стабильный характер, за исключением двух минимумов — Минимума Маундера и Минимума Дальтона, а также учитывая некоторое изменение амплитуд циклов, но декадные вариации в климате носят очень нестабильный характер, что можно предположить из противоречивости результатов, приводимых в литературе, затрагивающей обсуждаемую проблему.

Вопрос о воздействии солнечной активности на климат является исследуемым на протяжении достаточно продолжительного времени. Однако, результаты, встречающиеся в имеющейся на данный момент литературе по этой проблеме противоречивы, но каждый из них, при этом, по-своему обоснован. Объяснением такого расхождения результатов может служить ряд причин, в целом аналогичных случаю вопроса наличия декадных вариаций в климате:

- отклик климата на вариации солнечной активности на масштабах десятилетий изменяется во времени, то появляясь, то исчезая, то изменяя фазовое соотношение по каким-либо причинам;
- отклик может носить не обязательно глобальный, но распределённый каким-то образом по планете характер: солнечный декадный сигнал может прослеживаться в климате в “чувствительных” к солнечным вариациям регионах, в остальных частях планеты отклик может не наблюдаться вообще;
- методы, применяемые разными авторами, далеко не всегда годятся для исследования соотношений между двумя рядами на рассматриваемом интервале времени.

Например, коэффициент линейной кросс-корреляции между двумя рядами, связанными друг с другом только на отдельных интервалах времени и, при этом, с разными фазовыми соотношениями, может оказаться близким к нулю, хотя в реальности это означает лишь нестабильность, нелинейность связи между исследуемыми рядами. Несмотря на противоречивость результатов о связи декадных температурных вариаций с солнечной активностью, есть работы, посвящённые разработкам физических механизмов воздействия

солнечной активности на климат Земли. Логичность и произведённые модельные количественные оценки влияния говорят в пользу реальности эффекта солнечной активности в климате.

Возникает вопрос о причинах, почему отклик на солнечную активность есть не всегда. Возможным объяснением может быть наличие некоего, возможно нестабильного, фактора, оказывающего воздействие на климатическую систему и “разбивающего”, нарушающего или изменяющего связь между вариациями солнечной активности и климатом. Что именно может выступать в роли такого фактора, является отдельным вопросом. Однако, если говорить о каком-либо интенсивном процессе, способном оказать заметное влияние на климат, то можно предположить, что таковым является вулканизм, так как это очень мощное явление, оказывающее воздействие на климат Земли — не только локально, но и, в зависимости от типа и интенсивности извержения, — глобально.

Воздействие вулканических извержений на климат в настоящий момент является одним из бурно развивающихся направлений исследования. Неплохо изученным и доказанным является кратковременное воздействие извержений на климат. Влияние же на декадных масштабах и более не является хорошо исследованным. Что касается воздействия на атмосферу интенсивных вулканических извержений, то в этом случае возможен глобальный эффект. Например, для извержений Эль-Чичон (1982) и Пинатубо (1991) наблюдалось глобальное, в атмосфере над всей планетой, увеличение коэффициента обратного аэрозольного рассеяния.

Особенно важен и интересен тот факт, что, как было показано в работе [49], разность значений приземной температуры воздуха в годы максимумов и минимумов 11-летнего цикла солнечной активности составляет в среднем  $0.2K$ , в то время как среднее похолодание в первый год после извержения, по данным о интенсивных извержениях XIX - первой половины XX столетия, приведённым в [225], составляет также приблизительно  $0.2K$ . Таким образом, эффекты от солнечной и вулканической активности могут быть одного порядка, но оказывать воздействие на разных масштабах: почти сразу — через 1 год (вулканизм) или же постепенно — в течение примерно 11 лет (солнечная активность). Это говорит о том, что совокупность таких факторов, как солнечная и вулканическая деятельность, может оказывать на климат комбинированное влияние, взаимоусиливающее или взаимоослабляющее воздействие каждого фактора в отдельности.

Настоящая работа посвящена исследованию декадных вариаций в климатических рядах (глобальных и региональных, по замерам сети метеорологи-

ческих станций) относительно поведения внешних факторов (таких как солнечная, вулканическая и геомагнитная активность). Особое внимание уделяется:

- изучению комбинированного воздействия на климат солнечной и вулканической активности, как возможной причины проявления в климате конца XX столетия квази-11-летней периодичности;
- выявлению закономерностей проявления 22-летней вариации в когерентности солнечного и геомагнитного факторов с температурой, а также её причин;
- исследованию географического распределения откликов температурных данных на вариации внешних параметров.

### **Актуальность проблемы.**

Исследования колебаний климата и их происхождения являются очень важными не только “в общем”, но и в контексте проблемы выявления причин глобального потепления. По-прежнему окончательно не установлено, является ли единственной причиной наблюдающегося начиная приблизительно со второй половины XX столетия сравнительно интенсивного потепления климата антропогенный фактор, или же глобальное потепление может быть объяснено естественными причинами, либо комбинированным воздействием антропогенного фактора и естественных воздействий. В этом контексте интересен вопрос, а наблюдались ли подобные “глобальные потепления” в прошлом или же нет. Вопросы о том, насколько автономной системой является климат, в какой степени он подвержен воздействиям вариаций внешних параметров, таких как солнечная активность и вулканизм, до сих пор не имеют однозначных ответов, несмотря на то, что исследования в этой области (особенно по отдельным направлениям: солнечная активность и климат, вулканическая активность и климат) ведутся достаточно давно. И исследование роли внешних (солнечного и вулканического) сигналов в вариациях климата Земли является важным “шагом” на пути поиска ответов на поставленные вопросы.

### **Цель настоящей работы.**

Цель настоящей работы — выяснить, присутствуют ли декадные вариации



в климате Земли, попытаться установить их пространственно-временное распределение и причины, а также, что очень важно, найти возможное объяснение противоречивости представленных в литературе результатов исследований воздействия солнечной активности на климат Земли. Предлагается исследовать роль солнечного и вулканического сигналов в декадных (11- и 22-летних) вариациях климата Земли. Кроме того, предлагается обсудить возможность комбинированного воздействия на климат солнечной и вулканической деятельности. В задачи данной диссертации также входит исследование отклика климата на вариации солнечной и геомагнитной активности на 11- и 22-летних периодах как во время достаточно высокого, так и низкого, близкого к нулю, уровня вулканической активности. Кроме того, предполагается выявить и изучить географическое распределение зон, наиболее “чувствительных” к индивидуальному и комбинированному воздействию вариаций внешних факторов на частотах, соответствующих 11- и 22-летним периодичностям.

Таким образом, основные задачи данной диссертации можно сформулировать следующим набором вопросов, на которые хотелось бы получить ответы по результатам исследования:

1. Наблюдаются ли 11- и 22-летние периодичности в климате?
2. Связаны ли рассматриваемые вариации климата с солнечной активностью?
3. Насколько эта связь стабильна, или же присутствует влияние вулканического фактора?
4. Как отклик распределён пространственно и по времени?
5. Какой из солнечных процессов и на каких периодах (11 лет или 22 года) оказывает наибольшее воздействие на климат?

### **Научная новизна.**

1. Исследована возможность обусловленности наблюдаемых в приземной температуре воздуха цикличностей комбинированным воздействием солнечной и вулканической активности на параметры нижней атмосферы Земли. Под комбинированным воздействием, в данном случае, подразумевается “благоприятное” совпадение фаз двух независимых процессов

(вариаций солнечной и вулканической активности), вызывающее последовательно два противоположных отклика в климате (например, потепление и похолодание). Если такое совпадение происходит хотя бы два раза подряд, то отклики на них климата искусственно образуют цикл.

2. Выдвигается гипотеза о том, что причиной наблюдаемой во многих климатических данных второй половины XX столетия квази-11-летней периодичности является комбинированное воздействие солнечной и вулканической активности.
3. Был исследован отклик климата на 11- и 22-летние вариации солнечной и геомагнитной активности при различных уровнях вулканической активности и разной степени воздействия, оказываемого вулканическими извержениями на климат Земли. В результате этого исследования были выявлены условия отклика климата на вариации солнечной активности на 11- и 22-летних периодичностях; выдвинуты гипотезы о физических процессах на Солнце, ответственных за когерентность с климатическими (температурными) факторами; обсуждаются масштабы солнечных магнитных полей, воздействующих на климат Земли посредством вариаций солнечной активности на различных периодах.
4. Исследовано географическое и временное распределение “чувствительных” к внешним воздействиям климатических зон на частотах, соответствующих 11- и 22-летней периодичности.
5. Установлено, какой из таких факторов, как солнечная и геомагнитная активность, и на какой частоте (соответствующей 11- или 22-летней периодичности) имеет наибольшее отражение в вариациях приземной температуры Земли.

### **Научная и практическая ценность.**

Полученные результаты позволяют уточнить оптимальные условия (в зависимости от воздействующих факторов) и географические регионы для дальнейших исследований воздействия солнечной активности на климат Земли.

Разработанное автором программное обеспечение может быть использовано в дальнейших исследованиях по данной тематике.

### **Защищаемые положения.**

1. Вариации отклика климата Земли на воздействие солнечного и вулканического факторов формируются в результате их комбинированного влияния: случайно-распределённые вулканические извержения, воздействуя на климат, изменяют, усиливают или ослабляют (в зависимости от фазового соотношения) вариации в температуре, обусловленные периодическим солнечным воздействием;
2. Квази-22-летний сигнал в аномалиях глобальной приземной температуры воздуха обусловлен, вероятнее всего, вариациями солнечной активности и наблюдается в отсутствие интенсивных вулканических извержений, когда их глобальное воздействие на климат (*DVI*-индекс) практически нулевое;
3. Северо-Атлантический регион является наиболее вариабельной климатической зоной, наиболее “чувствительной” к воздействию солнечной активности на периодах 11 и 22 года;
4. Среди исследованных 11- и 22-летних вариаций солнечной и геомагнитной активности отклик в температуре на максимальном количестве станций наблюдается для 22-летних вариаций геомагнитной активности.

### **Личный вклад автора.**

Автор принимал участие в постановке задачи, отборе и обработке экспериментального материала, в разработке, создании и тестировании программного обеспечения для обработки баз климатических данных в контексте задач данной работы, в анализе результатов. Все изложенные в диссертации результаты получены автором самостоятельно или на равных правах с соавторами.

### **Апробация работы.**

Результаты исследований, представленные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на научных семинарах НИИФ СПбГУ, а также на 8 международных конференциях, 1 Всероссийской конференции и 1 международной молодёжной научной школе:

1. International conference “Problems of GEOCOSMOS-2002”, St.Petersburg, Russia, May 2002;

2. “Chapman Conference on Physics and Modelling of the Inner Magnetosphere”, Helsinki, Finland, August 2003;
3. IX Пулковская международная конференция “Солнечная Активность как Фактор Космической Погоды”, Санкт-Петербург, ГАО, Пулково, Россия, Июль 2005;
4. “2nd European Space Weather Week”, ESA, ESTEC, Noordwijk, Netherlands, November 2005;
5. International conference “Problems of GEOCOSMOS-2006”, St.Petersburg, Russia, May 2006;
6. “Long-Term Trends Workshop 2006”, SGO, Sodankylä, Finland, September 2006;
7. “3rd European Space Weather Week”, Brussels, Belgium, November 2006;
8. “European Research Course on Atmospheres”, Université Joseph Fourier, Grenoble, et l’Observatoire de Haute Provence, France, January-February 2007;
9. XI Пулковская международная конференция “Физическая Природа Солнечной Активности и Прогнозирование её Геофизических Проявлений”, Санкт-Петербург, ГАО, Пулково, Россия, Июль 2007;
10. “9th International Precipitation Conference”, Paris, France, November 2007.
11. “2009 - Mechanisms of Quaternary Climate Change”, Obergurgl, Austria, June 2009.
12. Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца “Год Астрономии: Солнечная и Солнечно-Земная Физика - 2009”, Санкт-Петербург, ГАО, Пулково, Россия, Июль 2009;

### **Публикации.**

По теме диссертации опубликовано 10 работ, из которых: три статьи в рецензируемых научных журналах, четыре сообщения в сборниках трудов конференций и один доклад в электронном сборнике трудов конференции (в качестве первого автора), а также одна статья и одно сообщение в сборнике трудов конференции с участием в качестве соавтора.

1. A.L. Morozova, M.I. Pudovkin, and T.V. Barliaeva, *Variations of the Cosmic Ray Fluxes as a Possible Earthquake Precursor*, Physics and Chemistry of the Earth (A), Vol.**25**, No.3, pp.321-324 (2000).
2. Т.В. Барляева, М.И., Пудовкин и А.Л. Морозова, *Влияние космических факторов на возникновение землетрясений*, Сборник трудов конференции “ГЕОФИЗИКА-99”, Санкт-Петербург, 1999, стр. 8-19.
3. T.V. Barliaeva, M.I. Pudovkin, and A.L. Morozova, *Variations of solar and geomagnetic activity and gradient of atmosphere pressure variations on the litosphere plate boundaries in Central Asia as a possible earthquakes precursors*, Proceedings of the conference “IAC-2000”, Moscow.
4. T.V.Barliaeva, M.I. Pudovkin, and A.L. Morozova, *Variations of the number of weak and strong earthquakes for 1977-1988 years and their possible precursors*, Physics and Chemistry of the Earth (C), Vol.**26**, No.10-12, pp.801-805 (2001).
5. D. I. Ponyavin, T. V. Barliaeva, and N. V. Zolotova, *Hypersensitivity of climate response to solar activity output during the last 60 years*, Mem. S.A.It. Vol. 76, 1026 (2005).
6. T. V. Barlyaeva and D. I. Ponyavin, *Solar signal in climate change: cross wavelet analysis of time-series*, Proceedings of 2ESWW, ESA WebSite (2005).
7. Т. В. Барляева, Д. И. Понявин, *EMD и вейвлет анализ вариаций климата и солнечной активности*, Сборник трудов IX международной конференции “Солнечная активность как фактор космической погоды”, 4-6 июля 2005 г., ГАО, Пулково, Санкт-Петербург, 2006, с.125-132.
8. T. V. Barlyaeva and D. I. Ponyavin, *Solar and volcanic signals in climate variations*, in: Proceedings of the 6th International conference “GEOCOSMOS-2006”, Petrodvorets, May 23-27, 2006, eds. V. N. Troyan, V. S. Semenov, M. V. Kubyshkina, St. Petersburg, 2006, p.266-271.
9. Т. В. Барляева, Д. И. Понявин, *Когерентность солнечной и вулканической активности*, Сборник публикаций XI-й Пулковской международной конференции “Физическая природа солнечной активности и прогнозирование её геофизических проявлений”, 2-7 Июля 2007 г., ГАО, Пулково, Санкт-Петербург, 2007, с.31-32.
10. Т. В. Барляева, И. А. Миронова, и Д. И. Понявин, *О природе декадной вариации в климатических данных во второй половине XX века*, “Доклады Академии Наук”, Том 425, №3, стр. 395–399 (2009).

## Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы из 274 наименований, содержит 220 страниц машинописного текста, включая 47 рисунков и 4 таблицы.

## Содержание работы.

Во **Введении** обоснована актуальность и перспективность темы исследования, сформулированы цель работы и основные положения, выносимые на защиту, отмечена научная новизна, практическая ценность работы, кратко изложено содержание работы.

В **Главе 1** приведено описание методологии, используемой в данной диссертации. Наряду с математическими алгоритмами методов, применяемых для анализа данных, рассматриваются тестовые примеры, позволяющие проиллюстрировать особенности и возможности используемых методологических инструментов. А также приводится обоснование именно такого выбора математического инструментария для данного исследования. В *Разделе 1.1* содержатся основные принципы вейвлет-анализа. Приведены математические основы как непосредственно метода вейвлет-анализа, так и его расширения — метода вейвлет кросс-когерентности, широко используемых в данной работе. Обсуждаются особенности применения этих методов и возможные “подводные камни” — теоретически и на тестовых примерах. *Раздел 1.2* посвящён методу разложения по эмпирическим модам (Empirical Mode Decomposition, *EMD*). Приведены математические основы метода, а также тестовые примеры применения. Кроме обсуждения методов вейвлет-анализа, анализа вейвлет-кросс-когерентности и *EMD*-метода по-отдельности, в данной Главе на тестовых примерах рассматривается применение вейвлет- и *EMD*-методов в комбинации: вейвлет-анализ применяется к выделенным с помощью *EMD* модам, и исследуются полученные таким образом вейвлет-спектры. Достоинство такого комбинированного метода состоит в том, что анализируется не исходный ряд, содержащий различные моды, тренды и шумы, а уже выделенный, “очищенный”, сигнал, что позволяет более точно проследить его эволюцию, без накладывающихся “посторонних” колебаний.

В **Главе 2** обсуждаются цикличности, наблюдаемые в климате, и их возможные объяснения. Особое внимание уделяется наблюдаемым в конце XX столетия периодичностям и трендам в условиях глобального потепления. Ис-

следуются три ряда аномалий глобальной приземной температуры воздуха с 1880 г. по 2006 г. (среднегодовые значения) из разных баз данных: “National Aeronautics and Space Administration - Goddard Institute for Space Studies” (*NASA-GISS*), “Climatic Research Unit of the East Anglia University” (*CRU*) (подготавливающего данные совместно с “Hadley Centre of the UK Met Office”) и “National Climatic Data Center” (*NCDC*). Ряды отличаются исходным набором метеорологических станций, используемых при построении ряда, учитываемыми географическими зонами, а также способами предварительной обработки данных. Обсуждаются когерентности между этими рядами и наблюдаемые особенности, важные при интерпретации дальнейших результатов данной Главы. В качестве методов исследования используются вейвлет-анализ и метод разложения по эмпирическим модам. Методы применяются как по-отдельности, так и в комбинации друг с другом, что позволяет проследить эволюцию выбранной моды в отдельности, без наложения других мод, которые могут быть более значимыми. Такое комбинированное использование методов позволяет, например, исследовать с помощью вейвлет-анализа сигналы, длина периода которых близка к 11 и 22 годам, предварительно выделив их из исходного температурного ряда, содержащего моды разных частот.

**Глава 3** посвящена обсуждению наблюдаемых в солнечной, геомагнитной и вулканической активности периодичностей, а также — исследованию наблюдаемых между рядами, характеризующими солнечную и вулканическую активность, когерентностей, в частности, “островка” в конце XX столетия и устойчивой полосы когерентности до 1900 г. В качестве характеристики солнечной активности рассматривается ряд среднегодовых значений количества групп солнечных пятен (Group Sunspot Numbers, *GSM*). Этот ряд является наиболее длинным инструментальным рядом по солнечной активности: данные по *GSM*-индексу доступны с начала XVII века. Для характеристики вулканического воздействия на климат были выбраны среднегодовые глобальные значения Dust Veil Index ( $DVI_{Global}$ ), рассчитываемого по изменениям в радиационном, температурном балансе атмосферы и с учётом размеров и продолжительности существования пылевого облака вследствие вулканического извержения. Данные по индексу *DVI* имеются с XVI века. Если в случае солнечной активности периодичность обусловлена внутрисолнечными процессами, солнечным динамо и носит более или менее стабильный характер с определёнными закономерностями, то в случае вулканической активности возникающие периодичности носят, как правило, спонтанный характер, определяющийся частотой интенсивных вулканических извержений. Поэтому

когерентности, возникающие между такими “разными” процессами интересны не только сами по себе, но и в совокупности — в контексте возможных последствий в атмосфере и климате Земли. Как уже говорилось выше, эти два фактора могут усиливать или ослаблять эффект друг друга в климате в зависимости от их фазового соотношения, поэтому в данной Главе особое внимание уделяется исследованию временных соотношений рядов солнечной и вулканической активности.

В **Главе 4** рассматривается воздействие солнечной, геомагнитной и вулканической активности на климат Земли на примере ряда вариаций глобальной приземной температуры воздуха из базы данных NASA-GISS). Кроме роли в вариациях глобальной приземной температуры воздуха каждого из внешних факторов в отдельности, исследуется возможность комбинированного воздействия солнечной и вулканической активности на климат Земли. В качестве характеристики солнечной активности использовались среднегодовые значения индекса количества солнечных пятен (Sunspot Numbers, *SSN*), в качестве вулканической — значения Volcanic Explosivity Index (*VEI*), являющегося “геологической” характеристикой каждого извержения в отдельности, и среднегодовые значения *DVI<sub>Global</sub>*-индекса, отражающего воздействие вулканических извержений на климат Земли. Как уже говорилось в описании Главы 3, достаточно стабильные вариации солнечного происхождения могут при “благоприятном” стечении обстоятельств оказаться когерентными со спонтанными вариациями вулканического происхождения. Ввиду этого представляется особо интересным исследовать роль такого комбинированного сигнала в вариациях и трендах, наблюдающихся в климате Земли. В данной Главе обсуждаются когерентности внешних факторов с климатическими (температурными) на декадных и бидекадных масштабах. Чтобы выяснить, какой именно из солнечных процессов ответственен за когерентность с климатом на 22-летней периодичности, была проанализирована когерентность геомагнитной активности с данными по глобальной приземной температуре воздуха. В качестве характеристики геомагнитной активности был взят планетарный индекс *C<sub>9</sub>*, данные по которому имеются с середины XIX столетия.

**Глава 5** посвящена исследованию “чувствительности” различных географических зон к воздействию солнечной, геомагнитной и вулканической активности в отдельности, а также к комбинированному воздействию солнечной и вулканической активности. Исследование проводится на основе анализа климатической базы данных Университета Восточной Англии (Climatic Research Unit, School of Environmental Sciences, University of East Anglia), а именно — комбинированной базы данных по вариациям приземной темпера-



туры воздуха и температуры приповерхностных вод океана, пересчитанных для “сетки” размером  $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ . Исследовались среднегодовые значения температурных данных. Исследуемый временной интервал — не менее длинный, чем 1910-1988 гг., а для большинства “станций” (узлов “сетки”) — длиннее, с конца XIX до начала XXI века. По результатам этого исследования была сформирована статистика, позволяющая определить, для какого из факторов (солнечной или геомагнитной активности) и на каких значениях периодов (11 лет или 22 года) наблюдается отклик в когерентности с температурными данными на наибольшем количестве “станций” (узлов “сетки”).

В **Заключении** обсуждается проведённое исследование, приведено его краткое резюме, а также сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

# Глава 1

## Методология

Данная работа затрагивает такие объекты, как климат, солнечная, геомагнитная и вулканическая активность. Как глобальный климат, так и региональные климаты, определяются множеством факторов, в числе которых присутствуют такие мощные процессы, как динамика атмосферы и океана. Колебания, присутствующие в климатических рядах, могут чётко проследиваться, а могут и “исчезать” как в действительности (будучи вызванными непродолжительными причинами), так и просто оказываться зашумлёнными. Воздействие рассматриваемых в данной работе внешних факторов также не является линейным. В случае вулканической активности наблюдаются “случайные” циклы, сформированные отдельными извержениями, что говорит о том, что если воздействие на климат вулканической активности есть, то оно не является постоянным и стабильным. В случае солнечной активности наблюдаемые линейные корреляции с климатическими параметрами могут менять знак на противоположный или исчезать и снова появляться в различные интервалы времени. Как было показано, например, в работе [186], когерентность между солнечными и климатическими рядами то наблюдается, то исчезает. Логично, что обычные кросс-корреляционные методы в таком случае дадут некий “средний” коэффициент кросс-корреляции, так как для каких-то интервалов времени он очень мал или вообще близок к нулю, а для каких-то интервалов времени — напротив, очень высок. Часто используемый Фурье-анализ также не очень подходит для обсуждаемого случая: Фурье-спектр даёт набор частот, наблюдающихся в исследуемом сигнале в каждый момент времени. Проследить же эволюцию сигнала с помощью Фурье-анализа сложно. Кроме того, линейная корреляция также может носить разный характер в зависимости от географического положения исследуемого географического региона (некоторые примеры приведены в работе [16]). Естественно предположить, что если какие-либо колебания в клима-

тической системе вызываются вышеупомянутыми внешними факторами, то они носят нелинейный характер. Таким образом, при выборе методов данного исследования особенно учитывался тот факт, что рассматриваемые процессы являются нелинейными. Следовательно, для данного исследования необходимы методы, позволяющие отслеживать нестационарные сигналы и их эволюцию. Ввиду того, что исследуемые ряды являются сильно зашумлёнными, то нужно иметь возможность раскладывать исходный ряд по модам, соответствующим разным частотам. Из имеющихся в настоящее время методов обработки и анализа данных были выбраны два:

- вейвлет-анализ, анализ вейвлет-кросс-когерентности и фаз — для исследования нелинейных сигналов в каждом из рассматриваемых процессов в отдельности, а также наблюдаемых между процессами связей, их эволюции;
- метод разложения по эмпирическим модам — для разложения исследуемого сигнала на моды разных частот.

В следующих двух Разделах этой Главы (1.1 и 1.2) эти методы, включая их математическое обоснование, особенности и частные случаи применения и интерпретации, рассматриваются подробно.

## 1.1 Вейвлет анализ и вейвлет кросс-когерентность

Вейвлет-анализ ([2, 243, 4]) — широко известный с начала 90-х годов XX-ого столетия инструмент анализа рядов данных. Он позволяет выявлять полосы, “островки” доминирующих частот в нестационарном сигнале и проследить их эволюцию. Именно в этом, в возможности исследования нестационарных сигналов, и состоит основное преимущество вейвлет-анализа перед, например, широко известным и повсеместно применяемым Фурье-анализом, а также перед методом расчёта коэффициентов кросс-корреляции двух рядов данных с целью выявления статистических связей между ними. Оба метода (Фурье и корреляционный анализ) подходят для анализа сугубо линейных процессов, но в случае нелинейности исследуемых процессов могут “пропустить” содержащийся в рядах данных нестационарный сигнал или же, напротив, сказать о наличии нескольких сигналов, наблюдаемых на одной и той же частоте, но в разное время, в то время как это может быть один и тот же сигнал, эволюционирующий, то пропадающий, то снова появляющийся.

При исследовании линейных корреляций двух рядов очень низкий коэффициент линейной корреляции может быть следствием нестационарности связи между рядами на исследуемой частоте. Безусловно, возникающие проблемы могут быть разрешены при помощи более скрупулёзного изучения каждой детали исследуемых рядов в совокупности с особенностями возникновения и исчезновения наблюдаемых линейных корреляций: например, путём рассмотрения отдельных временных интервалов рядов. Однако, ясно, что метод, наглядно отражающий эволюцию сигнала, гораздо более удобен для исследования нестационарных рядов. В такой ситуации необходимыми являются более “чувствительные” методы исследования, каковыми являются, например, вейвлет-анализ и его модификация для случая исследования соотношений между двумя процессами — анализ вейвлет-кросс-когерентности двух рядов данных.

Основная идея вейвлет-анализа состоит в построении амплитудно-частотного спектра сигнала по вейвлет-функциям [2, 243, 4]. Модификация вейвлет-анализа — кросс-вейвлет анализ [92, 243] позволяет идентифицировать зоны амплитудно-частотной когерентности двух рассматриваемых рядов, оценивать их амплитудные и фазовые соотношения, что, в свою очередь, помогает делать заключения о природе и физическом смысле этих соотношений. В данном исследовании использовался пакет программ по применению кроссвейвлет анализа в обработке рядов данных, разработанный для “MATLAB” А.Гринстедом и находящийся в свободном доступе в сети Интернет (<http://www.pol.ac.uk/home/research/waveletcoherence/>). Далее кратко изложена математическая основа вейвлет и вейвлет-когерентного анализа.

Определение непрерывного вейвлет-преобразования ( $W$ ) временной последовательности  $x_n$  ( $n = 0 \dots N - 1$ ) с шагом  $\delta t$  состоит в следующем [243]:

$$W_n^x(s) = \sum_{n'=0}^{N-1} x_{n'} \psi((n' - n)\delta t, s), \quad (1.1)$$

где коэффициенты

$$\psi(\Delta t, s) = c(s)\psi_0(\Delta t/s) \quad (1.2)$$

определяются с помощью базисной вейвлет функции  $\psi_0$ , которая локализована как по времени, так и по частоте. Кроме того,  $s$  — масштабный параметр,  $n$  — локальный временной индекс, а  $c(s)$  — нормирующий множитель. Изменяя масштаб  $s$  и двигаясь по временной оси  $n$  можно построить картину изменяющегося по времени и частоте отклика сигнала. В данной работе в качестве базисной функции (материнского вейвлета) используется комплекс-

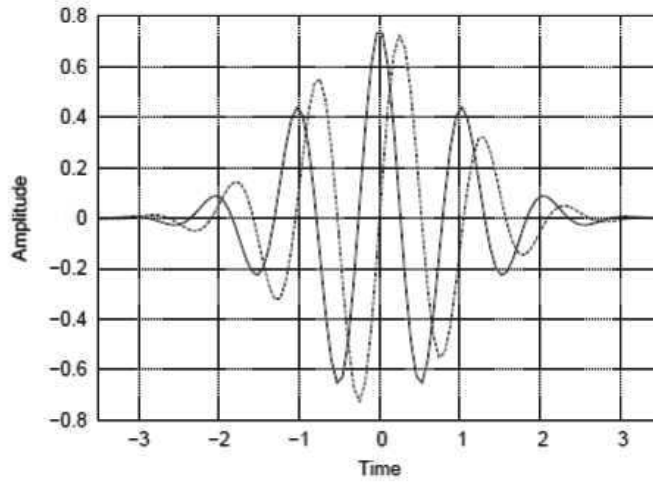


Рис. 1.1: Вещественная (сплошная линия) и мнимая (пунктирная линия) части вейвлета Морле для  $\omega_0 = 6$  (Рис.1 из [145]).

ный вейвлет Морле:

$$\psi_0[\eta] = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\eta^2/2}, \quad (1.3)$$

где  $\omega_0$  - безразмерная частота, здесь  $\omega_0 = 6$  (выбирается из соображения оптимальности временно-частотного разрешения), а  $\eta$  - безразмерный временной параметр. Вейвлет Морле приведён на Рис. 1.1. Стоит отметить, что в качестве базисной функции (материнского вейвлета) могут быть использованы различные функции, наиболее часто используемые из которых приведены на Рис. 1.2(А).

При выборе функции, которая может быть взята в качестве базисной для вейвлет-преобразования, должен быть соблюден ряд критериев, свойствами которыми эта функция должна обладать [2]: локализация, нулевое среднее, ограниченность, автомодельность базиса. Для данного исследования был выбран именно базисный вейвлет Морле, так как, удовлетворяя всем вышеперечисленным требованиям к базисной функции, он является очень хорошо локализованным как во временном пространстве, так и по частоте. Это плоская волна, модулированная гауссианом единичной ширины [2]. Кроме того, вейвлет Морле является комплексной функцией, что позволяет использовать его не только для анализа амплитуд сигнала, но и для анализа фаз, что особенно важно при исследовании осцилляций в отличие от вещественных базисных функций, которые хорошо применяются для выявления пиков и

разрывов [243]. На Рис. 1.2(В) приведены примеры вещественных и мнимых компонент базисных функций. Принимая во внимание, что речь идёт о разложении анализируемого сигнала по базисной функции, выбор в качестве таковой именно вейвлета Морле представляется обоснованным ещё и в связи с тем, что по форме сигнала вейвлет Морле является достаточно “простым”.

Значение безразмерного параметра  $\omega_0$  выбирается, исходя из критериев ортогональности, которые должны выполняться при применении дискретного вейвлет-преобразования [2, 243]. Оптимальным является значение  $\omega_0 = 6$ . При увеличении значения  $\omega_0$  возрастает угловая избирательность базиса, но уменьшается пространственная; при уменьшении значения  $\omega_0$  — наоборот [2].

Для каждого значения амплитуды вейвлет-спектра рассчитывается уровень его значимости [2, 243] над уровнем “красного” шума. В большей части данного исследования за статистически-достоверные, статистически-значимые вейвлет-амплитуды принимаются те значения амплитуд вейвлет-спектра, уровень значимости которого составляет не менее 95% над уровнем “красного” шума. В случаях, если рассматриваются другие значения порога статистической значимости, это оговаривается. Области вейвлет-спектра, являющиеся статистически-значимыми, выделяются на графиках вейвлет-спектра контурами чёрного цвета, образуя своего рода статистически-значимые “островки”.

Из-за погрешности, вносимой в значения вейвлет-спектра (также как и спектра вейвлет-когерентности), связанной с конечностью временного ряда, наиболее достоверными являются результаты, попадающие внутрь так называемого “конуса влияния”, который рассчитывается с учётом краевых эффектов.

Кросс-вейвлет-анализ является “расширением” вейвлет-преобразования. Он позволяет выявлять частоты и временные периоды когерентности двух рассматриваемых рядов, а также определить их фазовое соотношение в каждый момент времени. Согласно [145], вейвлет-когерентность ( $WCO$ ) двух рядов  $X$  и  $Y$  определяется как

$$WCO_n(s) = \frac{|WCS_n(s)|}{(WPS_n^x(s)WPS_n^y(s))^{1/2}}, \quad (1.4)$$

где

$$WCS_n(s) = \langle W_n^x(s)W_n^y(s)^* \rangle \quad (1.5)$$

- вейвлет кросс-спектр (Wavelet Cross Spectrum,  $WCS$ ), полученный из вейвлет-спектров каждого из двух рядов  $X$  и  $Y$  в отдельности. Автором диссертации при расчете кросс-спектров используется вейвлет Морле при  $\omega_0 = 6$ , а стати-

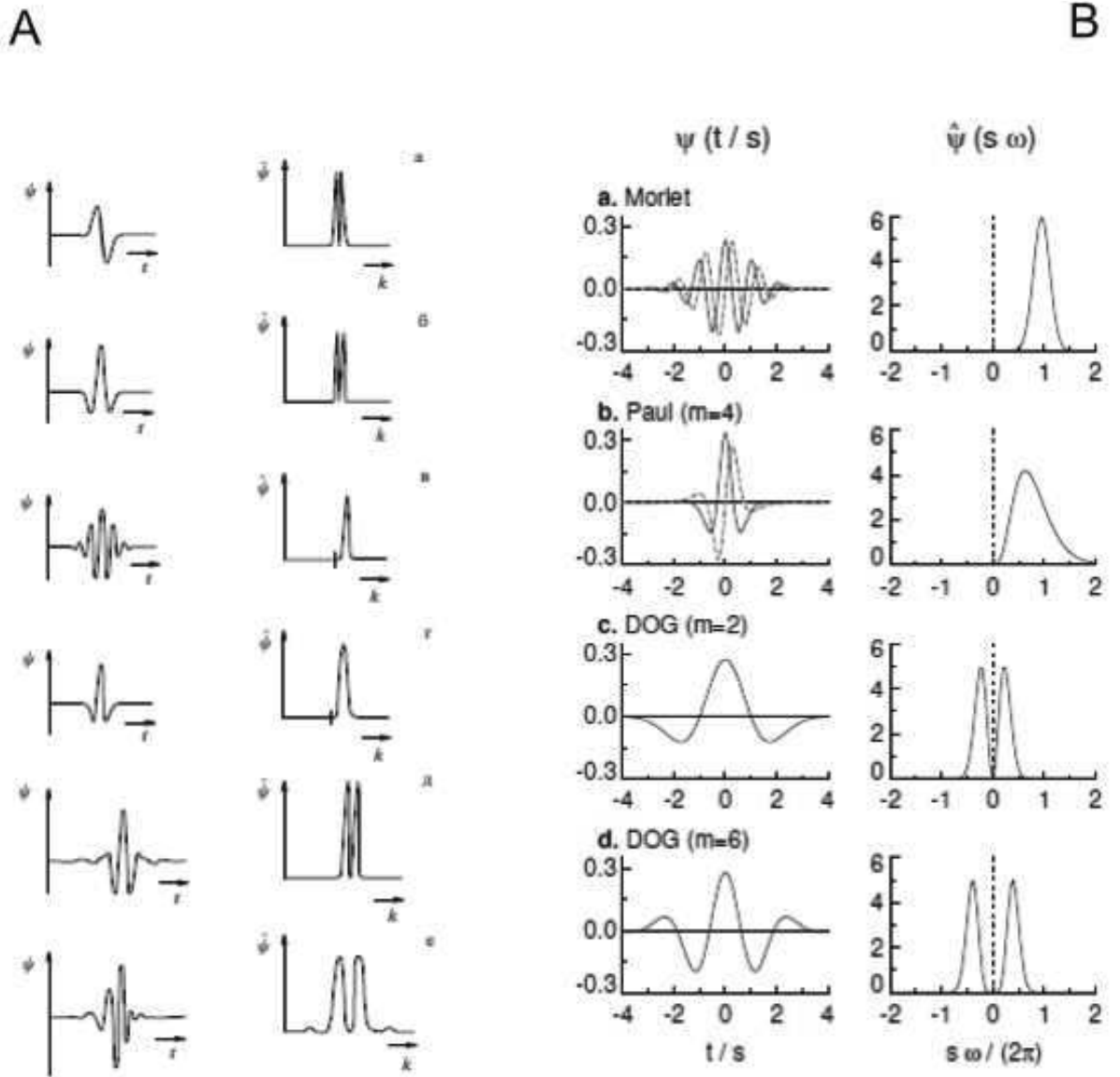


Рис. 1.2: (А) Примеры часто используемых базисных функций (материнских вейвлетов): а: WAVE, б: МНАТ, в: Morlet, г: Paul, д: LMB, е: Daubechies. В левой колонке показаны вейвлеты в зависимости от времени, а в правой колонке представлены их образы Фурье (Рис.2 в [2]). (В) Четыре различных базисных функции (материнских вейвлета). В левой колонке представлена временная зависимость вещественной (сплошная линия) и мнимой (пунктирная линия) частей этих функций, а в правой — их частотная зависимость. Масштаб выбран  $s = 10\delta t$ . а: Morlet, б: Paul ( $m=4$ ), в: Mexican hat (DOG  $m=2$ ) и д: DOG ( $m=6$ ) (Рис.2 в [243]).

стически значимым считается 95% превышение над уровнем “красного” шума.

$$WCS_n(s) = |WCS_n(s)|e^{i\Phi_n(s)} \quad (1.6)$$

- разложение вейвлет кросс-спектра по амплитуде и фазе,

$$WPS_n(s) = \langle W_n(s)W_n(s)^* \rangle \quad (1.7)$$

– вейвлет спектр мощности (Wavelet Power Spectrum, *WPS*).

Как в случае вейвлет спектров, так и в случае спектров вейвлет-когерентности, важным является то, насколько продолжительна и устойчива область выделенной частоты вейвлет-спектра. Например, вейвлет-спектр случайных распределений может давать кратковременные статистически-значимые “островки” выделенных частот. Вейвлет-когерентность же случайного распределения со строго периодической функцией также может давать короткие статистически-значимые интервалы выделенных частот. В обоих случаях речь идет о случайно возникающих вариациях в анализируемых рядах. В случае реальных рядов возникновение небольших статистически-значимых “островков” выделенных частот может означать как случайно возникшую неустойчивую периодичность, так и неустойчивые колебания самой физической системы, а также отклик системы на какое-либо внешнее воздействие (либо спонтанно, либо при условии нахождения системы в каком-то определенном состоянии, повышающем ее чувствительность к внешним воздействиям).

Результаты вейвлет анализа и анализа вейвлет-когерентности рядов при использовании пакета программ А. Гринстеда представлены на графиках следующим образом [92]. На графиках частотно-амплитудных спектров выделены конус влияния, статистически значимые области амплитудно-частотного спектра. Значения амплитуд спектра распределены в соответствии с картой цветов, приведенной рядом с графиком вейвлет-спектра. Соотношение фаз при исследовании вейвлет-когерентности двух рядов данных рассчитывается для зон статистически значимых амплитуд спектра вейвлет-когерентности и визуализируется при помощи наложения стрелок поверх амплитудно-частотного спектра. При расчете вейвлет-когерентности последовательностей  $X$  и  $Y$  — рядов экспериментальных данных в физической задаче (при технической реализации расчета — именно в таком порядке) направление стрелок слева направо означает, что ряд  $X$  и ряд  $Y$  находятся в фазе, справа налево — в противофазе, вниз — ряд  $X$  опережает ряд  $Y$  на четверть периода, вверх — ряд  $Y$  опережает ряд  $X$  на четверть периода (или же, что аналогично, за увеличением значений ряда  $X$  следует уменьшение значений ряда  $Y$  с запаздыванием на четверть периода — некая “противофаза с запаздыванием”).



При расчете вейвлет-когерентности рядов  $Y$  и  $X$  - наоборот (ряды  $X$  и  $Y$  меняются местами) [92].

Кроме вейвлет-когерентности для выявления статистически-значимых со-ответствий между двумя рядами данных может быть использовано построение вейвлет-кросс-спектра в соответствии с формулой (1.5). Однако, как было исследовано в работе [145] и проверено автором данной диссертации на тестовых примерах, пики на выделенных частотах в вейвлет-кросс-спектре далеко не всегда говорят о реальной связи рядов со статистической точки зрения. Это связано с необходимостью вводить нормировочный множитель в вейвлет функцию, выбор которого вносит дополнительную неоднозначность и может существенно менять свойства вейвлет анализа. В вейвлет-когерентности нормировочные факторы сокращаются и вышеуказанные проблемы не возникают.

Авторами [145] была предложена нормировка на получаемый вейвлет-кросс-спектр, позволяющая получать амплитудно-частотный вейвлет-кросс-спектр, отражающий реальные статистические связи между рядами.

В данной работе автором используется вейвлет-анализ отдельных рядов данных и анализ вейвлет-кросс-когерентности и фаз двух рядов данных. Получаемые в спектре вейвлет-кросс-когерентности пики отражают моменты времени, при которых частоты двух рассматриваемых функций совпадают. И это совершенно не обязательно говорит о наличии реальной связи между рядами. Рассматриваемые ряды могут быть даже абсолютно независимыми. Пики, получаемые при анализе реальных рядов данных путём исследования их спектра вейвлет-кросс-когерентности, могут оказаться “случайным совпадением”: в анализируемых рядах совершенно независимо могут содержаться колебания на близких частотах. Одной из задач интерпретации результатов является исследование, имеют ли полученные пики физический смысл, или же только статистический. Для этого нужно учитывать пики, получаемые в спектрах когерентностей между различными исследуемыми рядами, в контексте рабочей физической гипотезы.

На прилагаемых иллюстрациях приведены некоторые примеры вейвлет-спектров, вейвлет-кросс-спектров и спектров вейвлет-кросс-когерентности тестовых рядов данных. Рассмотрим их подробнее. На Рис. 1.3 (B,D,F) приведены вейвлет-спектры рядов данных (A,C,E), соответственно. Рис. 1.3 (B) иллюстрирует, что в вейвлет-спектре строго периодической функции, например, синусоидальной ( $\sin(x)$ ), как приведено на Рис. 1.3 (A), прослеживается явно выделенная, стабильная полоса частот вокруг частоты, на которой и наблюдается исследуемый сигнал. Вейвлет-спектр более сложной функции

$e^{\sin^2(x)}$  (Рис. 1.3 (С)), приведённый на Рис. 1.3 (D), также отражает то, что исследуемый сигнал является периодическим. Однако, в данном случае на полосу одной присутствующей в сигнале частоты накладывается другая — также присутствующая в исследуемом ряде. На графике Рис. 1.3 (F) приведён вейвлет-спектр нормального распределения, график которого можно видеть на Рис. 1.3 (E). Как видно, в спектре содержатся некие “островки” выделенных частот, что объясняется тем, что в нормальном распределении содержится много частот. В отличие от вейвлет-спектров периодических сигналов, в которых содержится стабильная ярко-выраженная полоса на выделенной частоте исследуемого сигнала, спектры случайных шумов могут содержать “островки” квази-периодичностей, сформировавшихся на интервале  $x$ , величина которого зависит от того, каким образом распределены частоты, содержащиеся в исследуемом случайном распределении. Вейвлет-спектр любого ряда, в котором содержатся выделенные частоты, — случайное это распределение, или содержащее какие-либо выделенные стабильные частоты, или же строго-периодическая функция, — отразит это. При интерпретации вейвлет-спектров реальных рядов данных, необходимо всегда иметь в виду, что спектр, получаемый в результате применения вейвлет-анализа к исследуемому ряду является математическим, статистическим результатом. А что касается физического смысла обнаруженных периодичностей — это вопрос дальнейшей интерпретации полученных с помощью вейвлет-анализа результатов.

Значительную роль играет соотношение амплитуд частот, содержащихся в сигнале. Это утверждение проиллюстрировано на Рис. 1.4. На панелях (A) и (B) Рис. 1.4 представлены график и вейвлет-спектр синусоидальной функции с возрастающей амплитудой для  $x \in [1; 300]$ . Как видно, статистически-значимый сигнал в вейвлет-спектре наблюдается при значениях  $x \in [100; 300]$ . На панелях (C) и (D) Рис. 1.4 представлены, соответственно, график и вейвлет-спектр этого же ряда, но его части для  $x \in [1; 100]$ . Из приведённых графиков видно, что в этом случае статистически-значимый сигнал в вейвлет-спектре наблюдается при значениях  $x \in [30; 100]$ . Таким образом, приведённый Рис. 1.4 иллюстрирует особенность вейвлет-анализа, состоящую в том, что наличие в вейвлет-спектре статистически-незначимого сигнала в совокупности с другими, статистически-значимыми, может говорить о том, что статистическая незначимость первого сигнала объясняется малостью его амплитуды по сравнению с амплитудами сигналов, которые в вейвлет-спектре отразились на статистически-значимом уровне. Это и понятно, так как большая разница в амплитудах может привести к тому, что часть частот с неболь-

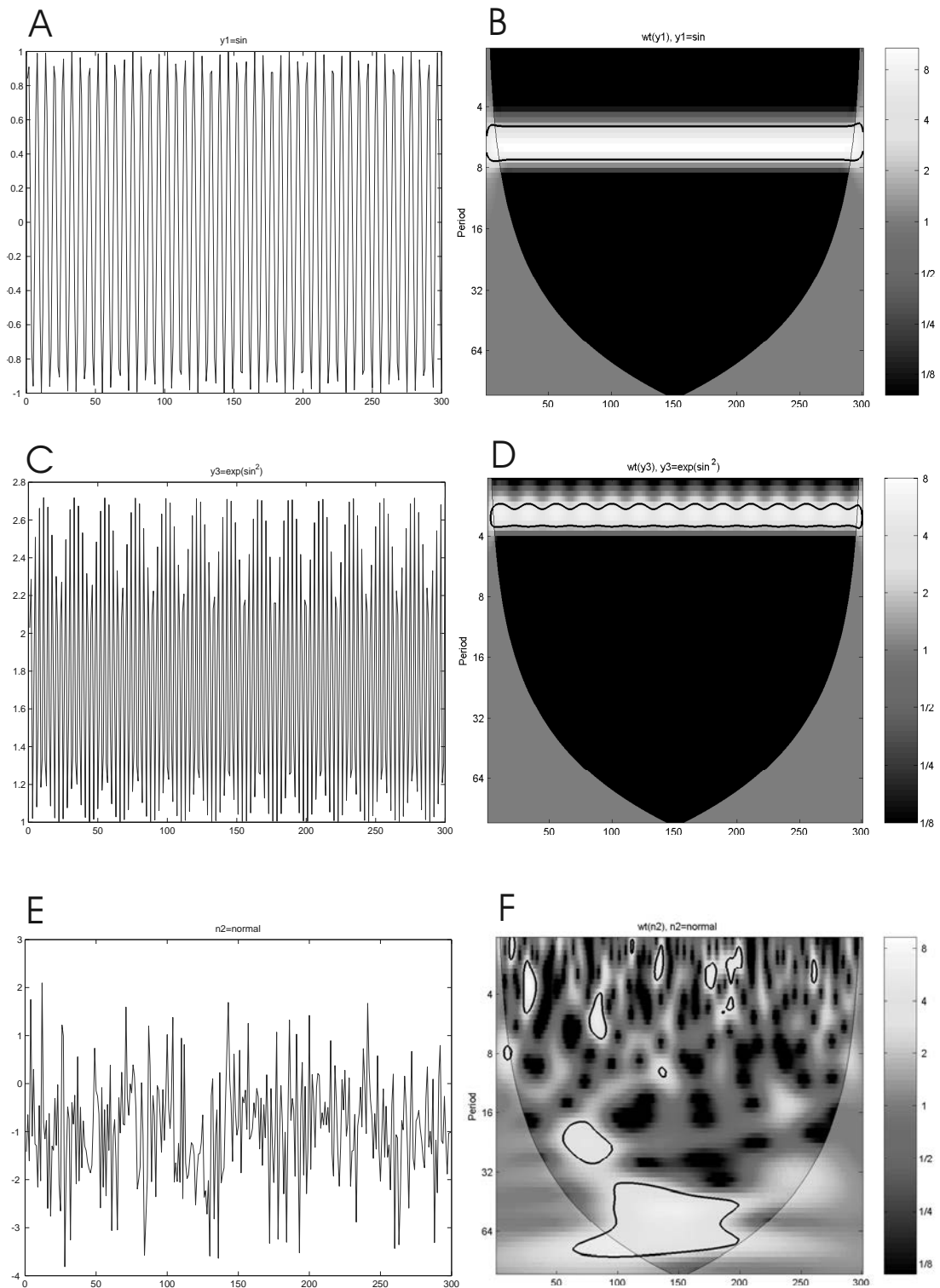


Рис. 1.3: Вейвлет-спектры (**B, D, F**) тестовых распределений, соответственно: синусоидальной функции  $\sin(x)$  (**A**, вейвлет-спектр — **B**), более сложной периодической функции  $e^{\sin^2(x)}$  (**C**, вейвлет-спектр — **D**) и нормального распределения (**E**, вейвлет-спектр — **F**).

шими амплитудами оказывается ниже порога, используемого при расчёте статистически-значимых областей спектра — 95% над уровнем “красного” шума.

На Рис. 1.5 (B,D,F) приведены результаты вейвлет-анализа для некоторых комбинаций нормального распределения и синусоидальной функции, графики которых представлены на Рис. 1.5 (A,C,E). На Рис. 1.5 (A) приведён график нормального распределения с “вставленным” в середине небольшим (в несколько периодов, для  $x \in [151; 170]$ ) отрезком синусоидальной функции  $\sin(x)$ , график и вейвлет-спектр которого  $x \in [1; 300]$  приведены на Рис. 1.3 (A). Амплитуда синусоидальной функции варьируется в том же диапазоне амплитуд, что и амплитуда нормального распределения. На Рис. 1.5 (C) приведён график нормального распределения с “вставленным” в середине отрезком синусоидальной функции, варьирующейся в диапазоне амплитуд, превышающем диапазон вариаций амплитуд нормального распределения в 10 раз. На Рис. 1.5 (E) приведён график ряда, полученного путём суммирования нормального распределения и синусоидальной функции, варьирующейся в том же диапазоне амплитуд, что и нормальное распределение. Как видно из приведённого на Рис. 1.5 (B) вейвлет-спектра, если у нас имеется нормальное распределение, а в середине “вставлен” непродолжительный синусоидальный сигнал (для  $x \in [151; 170]$ ), то в вейвлет-спектре видно как синусоидальный сигнал, так и случайно выделенные частоты нормального распределения. Ввиду того, что в этом примере взят небольшой отрезок синусоидальной функции, то соответствующий ему статистически-значимый “островок” в вейвлет-спектре сравним по величине с “островками”, соответствующими частотам нормального распределения. Этот факт может быть очень интересен при исследовании методом вейвлет-анализа реальных рядов данных: в данном тестовом примере априори известно, что один из “островков” соответствует реальному периодическому сигналу, а остальные — нормальному распределению. В исследованиях же реальных рядов, получая подобный вейвлет-спектр, необходимо внимательно изучить причины возникающих “островков” — они могут быть как случайными, так и имеющими физическое происхождение. В аналогичном рассмотренному случае, но если амплитуда периодического сигнала сильно превышает амплитуду нормального распределения, то вейвлет-спектр будет иным (ситуация с важностью соотношения амплитуд частот, содержащихся в исследуемом сигнале, рассматривалась выше). На Рис. 1.5 (C) приведён пример такого ряда. В этом тестовом примере амплитуда синусоидальной функции превышает амплитуду нормального распределения в 10 раз. Как видно из Рис. 1.5 (D), в отличие от предыдущее-

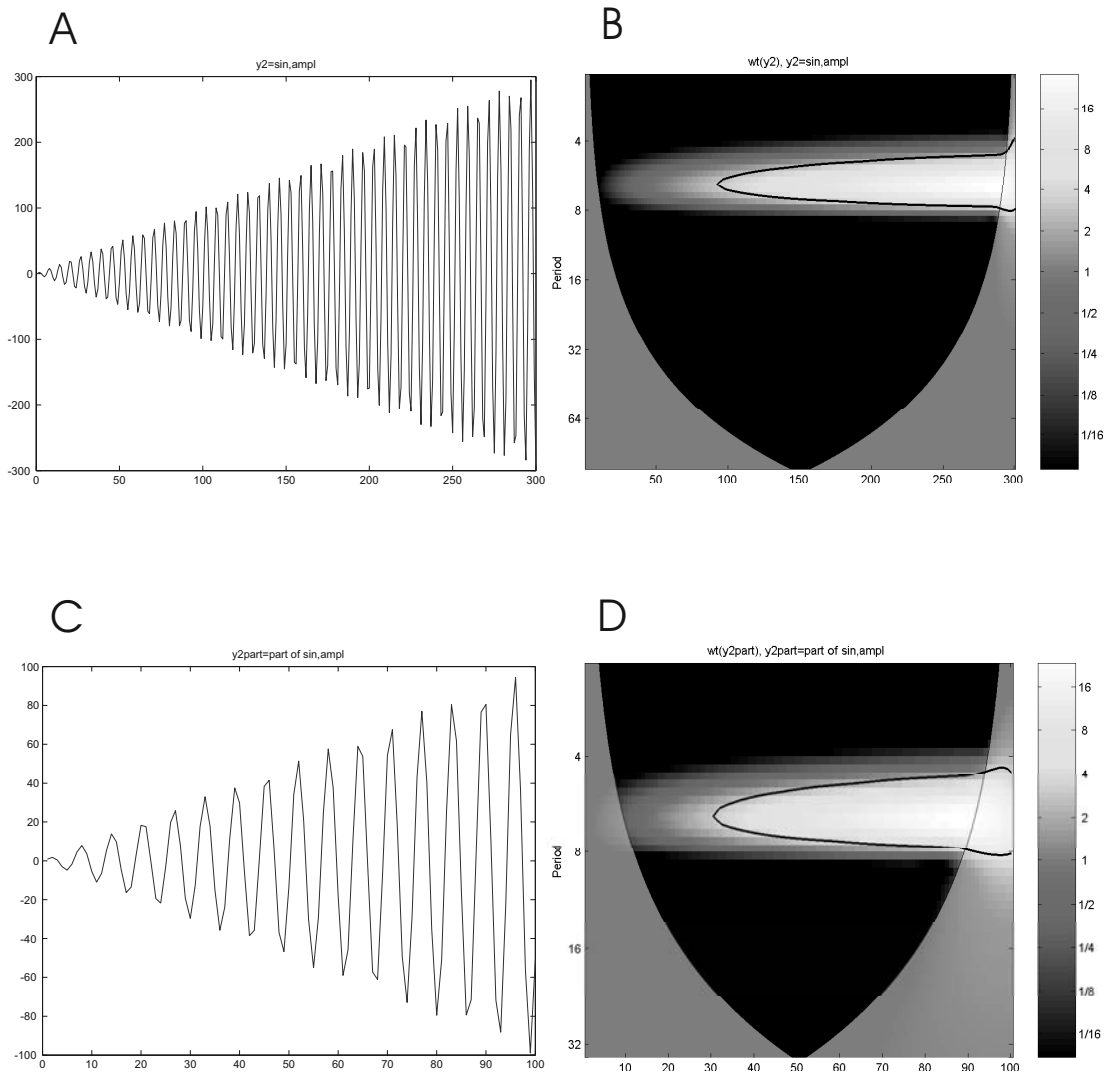


Рис. 1.4: Синусоидальная функция  $\sin(x)$  ("x" принимает значения от 1 до 300 (A)) и её вейвлет-спектр — B. Та же самая синусоидальная функция  $\sin(x)$ , но для "x", принимающих значения от 1 до 100 (C) и её вейвлет-спектр — D.

го случая (Рис. 1.5 (В)), при таком соотношении амплитуд статистически-значимым является, помимо ещё одного совсем небольшого, лишь “островок” спектра, соответствующий синусоидальной функции. На Рис. 1.5 (F) представлен вейвлет-спектр ряда (Рис. 1.5 (E)), полученного суммированием ряда нормального распределения и синусоидальной функции на интервале  $x \in [1; 300]$ . Можно видеть целую серию статистически-значимых “островков”, находящихся на уровне частоты синусоидальной функции. Кроме того, наблюдается ещё ряд “островков”, соответствующих частотам исследуемого нормального распределения.

Из вышеприведённых примеров применения вейвлет-анализа видно, что при исследовании рядов реальных данных нужно учитывать такие особенности данной методики, как важность соотношения амплитуд частот в исследуемом сигнале, а также тот факт, что вейвлет-анализ позволяет выявить статистически-значимые области вейвлет-спектра, но природа и физическая обоснованность их является отдельным вопросом.

В качестве примера вейвлет-когерентности и фаз здесь приведены два спектра, представленные на Рис. 1.6. На панели (А) Рис. 1.6 представлены спектр вейвлет-кросс-когерентности и фаз двух периодических функций:  $\sin(x)$  (Рис. 1.3 (А,В)) и  $e^{\sin(x)}$  (Рис. 1.3 (С,Д)), а на панели (В) Рис. 1.6 — спектр вейвлет-когерентности и фаз нормального распределения (Рис. 1.3 (Е,Ф)) и периодической функции  $\sin(x)$  (Рис. 1.3 (А,В)). Как видно, когерентность двух периодических функций наблюдается на определённых частотах, присутствующих в обеих исследуемых функциях. В случае двух периодических функций (А) — это устойчивые выделенные зоны. В случае же периодической функции и нормального распределения (В) — своего рода “отклик” частот нормального распределения на частоту периодической функции. В данном случае — на частоту функции  $\sin(x)$ . Ввиду того, что в нормальном распределении представлен широкий спектр частот, если бы вместо рассматриваемой здесь синусоидальной функции была взята другая периодическая функция, с другим значением частоты, то спектр изменился бы, но “островки” когерентности были бы расположены в полосе частот вокруг частоты периодической функции. Что касается фазовых соотношений, то можно заметить, что в случае двух периодических функций (А) фазовое соотношение противоположное для двух симметричных зон статистически-значимых величин спектра вейвлет-когерентности, но в каждой зоне фазы устойчивы. Соотношение фаз для случая вейвлет-когерентности нормального распределения и синусоидальной функции (В) носит менее стабильный характер. В данном случае это объясняется случайным совпадением частот, присутствующих в

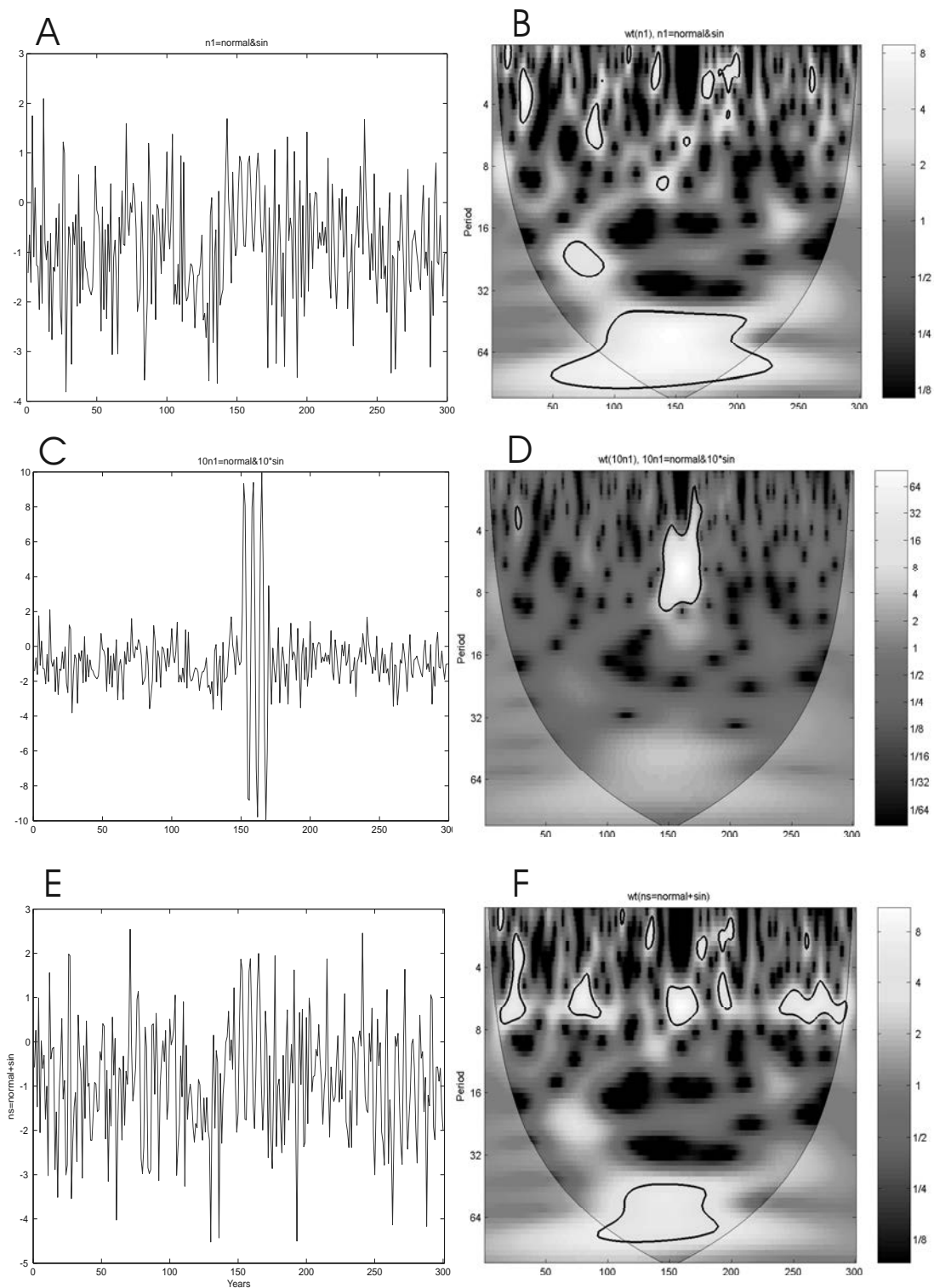


Рис. 1.5: (A, B): график и вейвлет-спектр ряда, составленного из нормального распределения (при значениях  $x \in [1; 150] \cup [171; 300]$ ) и синусоидальной функции  $\sin(x)$  (при значениях  $x \in [151; 170]$ ); (C, D): график и вейвлет-спектр аналогичной кривой, но амплитуда синусоидального сигнала в 10 раз больше, чем в предыдущем случае; (E, F): график и вейвлет спектр ряда, полученного путём суммирования нормального распределения и синусоидальной функции, “ $x$ ” принимает значения от 1 до 300.

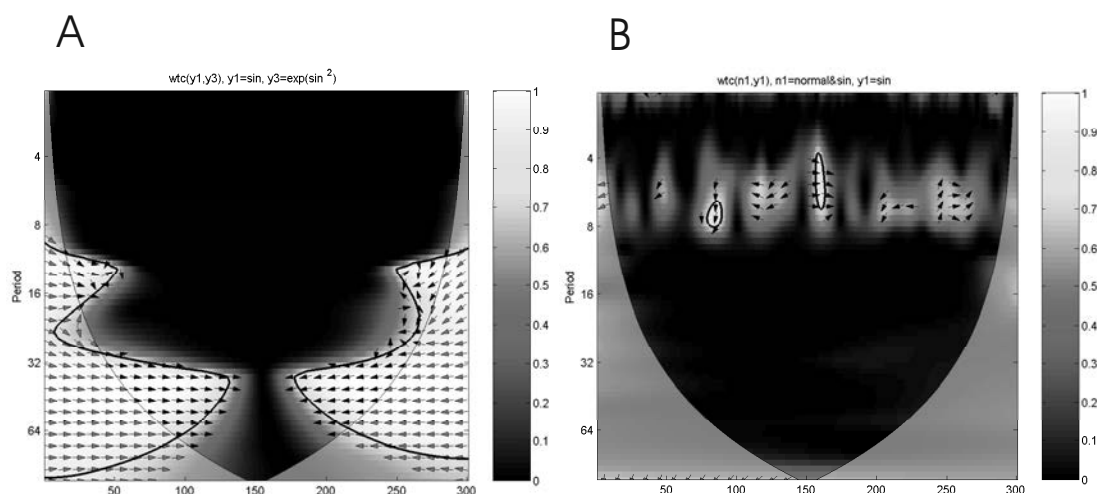


Рис. 1.6: (А): спектр вейвлет-когерентности и фаз синусоидальной функции  $\sin(x)$  (Рис. 1.3(A,B)) и более сложной периодической функции  $e^{\sin^2(x)}$  (Рис. 1.3(C,D)); (В): спектр вейвлет-когерентности и фаз ряда, составленного из нормального распределения (при значениях  $x \in [1; 150] \cup [171; 300]$ ) и синусоидальной функции  $\sin(x)$  (при значениях  $x \in [151; 170]$ ) (Рис. 1.5(A,B)), и синусоидальной функции  $\sin(x)$  (Рис. 1.3(A,B)).

нормальном распределении, с основной частотой периодической функции. Фазовое соотношение при этом разное для каждого случая возникновения вейвлет-кросс-когерентности рассматриваемых рядов. В случае же реальных данных, если в спектре вейвлет-когерентности двух исследуемых рядов содержится разные соотношения фаз и небольшие “островки” когерентности, то нужно искать причину этого. Может быть два объяснения. Первое состоит в том, что поведение исследуемых процессов меняется и это является причиной изменения фазовых соотношений, возникновения и исчезновения статистически-значимой когерентности. Второе — в случайном совпадении частот сигналов в двух исследуемых рядах, то есть, по сути, это — ситуация, аналогичная представленной на Рис. 1.6 (В): случайное совпадение частот.

На Рис. 1.7 и Рис. 1.8 представлен тестовый пример, иллюстрирующий ситуацию, когда исследуемый сигнал содержит колебания разных частот и амплитуд. Знание особенностей интерпретации вейвлет-спектров, спектров вейвлет-когерентности и фазовых соотношений в случаях такого типа является очень важным при обработке результатов исследования реальных рядов данных. На Рис. 1.7 (А) представлен график функции, составленной из трёх периодических синусоидальных сигналов разных частот и амплитуд: при  $x \in [1; 100]$  и  $x \in [201; 300]$  — одинаковой частоты, но различных амплитуд, при  $x \in [101; 200]$  — сигнал в 2 раза меньшей частоты с меньшей амплиту-



дой. Как видно из приведённого на Рис. 1.7 (В) вейвлет-спектра рассматриваемой функции, амплитуда вейвлет-спектра функции при больших амплитудах значений функции (при  $x \in [1; 100]$  и  $x \in [201; 300]$ ) высока и образует стабильные статистически-значимые полосы. А амплитуды вейвлет-спектра функции при небольших амплитудах значений функции (при  $x \in [101; 200]$ ) не только не являются статистически-значимыми, но явно выделенная и чётко видимая на исходном графике функции Рис. 1.7 (А) периодичность вообще едва просматривается в вейвлет-спектре. Этот случай ещё раз иллюстрирует важность соотношения амплитуд сигналов, содержащихся в исследуемом ряде данных, как уже было проиллюстрировано на Рис. 1.4 и подробно обсуждалось в тексте (выше в этом же Разделе). Однако, если же исследовать вейвлет-когерентность этой функции (Рис. 1.8 (А) и ряда периодической синусоидальной функции, как и при  $x \in [101; 200]$  (А), но для  $x \in [1; 300]$  (её график и вейвлет-спектр представлены на Рис. 1.7 (С, D), соответственно), то в полученном спектре вейвлет-когерентности явно виден сигнал на обсуждаемой частоте (Рис. 1.8 (А)). Кроме того, результат не меняется, если вместо ряда Рис. 1.7 (С), взять ряд с гораздо большей амплитудой. Этот факт иллюстрирует Рис. 1.8 (В), на котором приведён спектр вейвлет-когерентности ряда Рис. 1.7 (А) и ряда, аналогичного Рис. 1.7 (С), но с в 20 раз большей амплитудой. На Рис. 1.7 (Е) представлен ряд, аналогичный по структуре ряду, представленному на Рис. 1.7 (А), но с немного изменённым соотношением частот и амплитуд. А именно: частоты сигналов при  $x \in [1; 100]$  и  $x \in [201; 300]$  — в 3 раза меньше, чем на аналогичном графике на Рис. 1.7 (А), а при  $x \in [101; 200]$  — сигнал с в 2 раза меньшей амплитудой, нежели на аналогичном графике на Рис. 1.7 (А). Из вейвлет-спектра этого ряда (Рис. 1.7 (F)) видно, что заданный периодический сигнал с малой амплитудой при  $x \in [101; 200]$  не отображается как статистически-значимый, будучи “заглушён” сигналами на других частотах с гораздо большей амплитудой. Как видно из спектра вейвлет-когерентности и фаз, представленного на Рис. 1.8 (С), в этом случае, как и в случае Рис. 1.8 (А, В) наблюдается статистически-значимая когерентность на частоте и интервале  $x$ , где вейвлет-спектр не выдаёт статистически-значимого сигнала, хотя на графиках функций он виден чётко, но обладает гораздо меньшей амплитудой, нежели компоненты сигнала на других частотах, содержащиеся в исходном ряде.

Таким образом, если в спектре вейвлет-кросс-когерентности двух исследуемых рядов наблюдается сигнал на какой-либо частоте, а либо в вейвлет-спектре одного из рядов, либо в обоих на статистически-значимом уровне такого сигнала не наблюдается, то, вероятнее всего, этот сигнал “заглушает-

ся” в исходном ряде (исходных рядах) другими, более сильными сигналами на других частотах, имеющих бóльшую амплитуду.

Итак, в данном Разделе были рассмотрены основные особенности применения вейвлет-анализа , а также анализа вейвлет-когерентности и фазовых соотношений двух исследуемых рядов данных — особенности, наиболее существенные для данной работы, для интерпретации результатов, полученных в ходе исследования, и для оценки их “физичности”.

Другие примеры анализа тестовых и реальных (в частности, климатических) рядов данных с помощью построения амплитудно-частотных спектров кросс-когерентности, а также кросс-вейвлет спектров исследуемых рядов подробно обсуждаются в работах [144], [145] и [147].

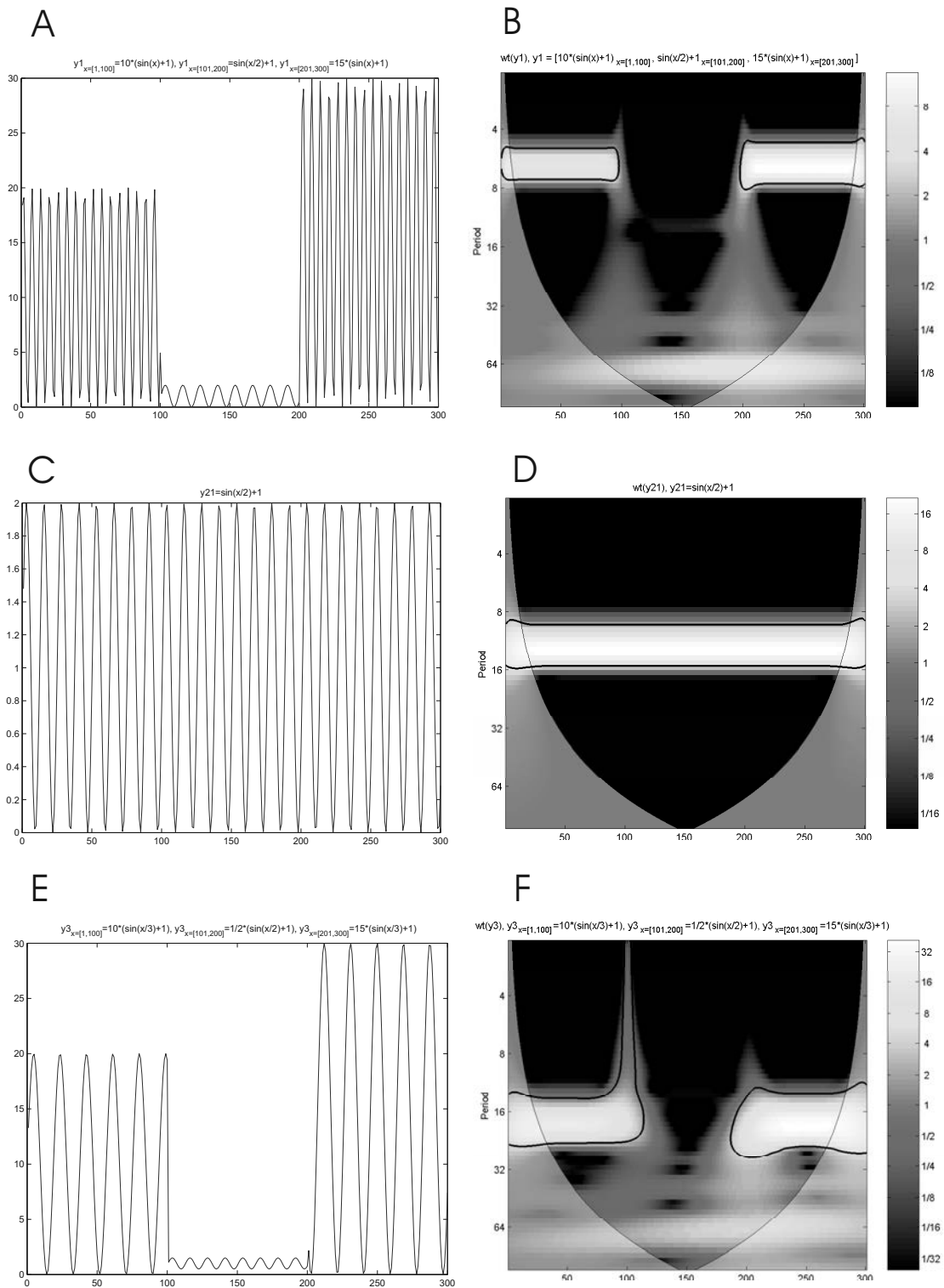


Рис. 1.7: Графики и вейвлет-спектры рядов, составленных из комбинаций  $\sin$ -функций разных частот и амплитуд. (**A, B**): при  $x \in [1; 100]$  и  $x \in [201; 300]$  — одинаковой частоты, но различных амплитуд, при  $x \in [101; 200]$  — в 2 раза меньшей частоты и меньшей амплитуды; (**C, D**): как и при  $x \in [101; 200]$  (A), но для  $x \in [1; 300]$ ; (**E, F**): при  $x \in [1; 100]$  и  $x \in [201; 300]$  — одинаковой частоты (в 3 раза меньше, чем в случае (A)), но различных амплитуд, при  $x \in [101; 200]$  — частоты как для этого же интервала в случае (A), но с амплитудой в 2 раза меньшей.

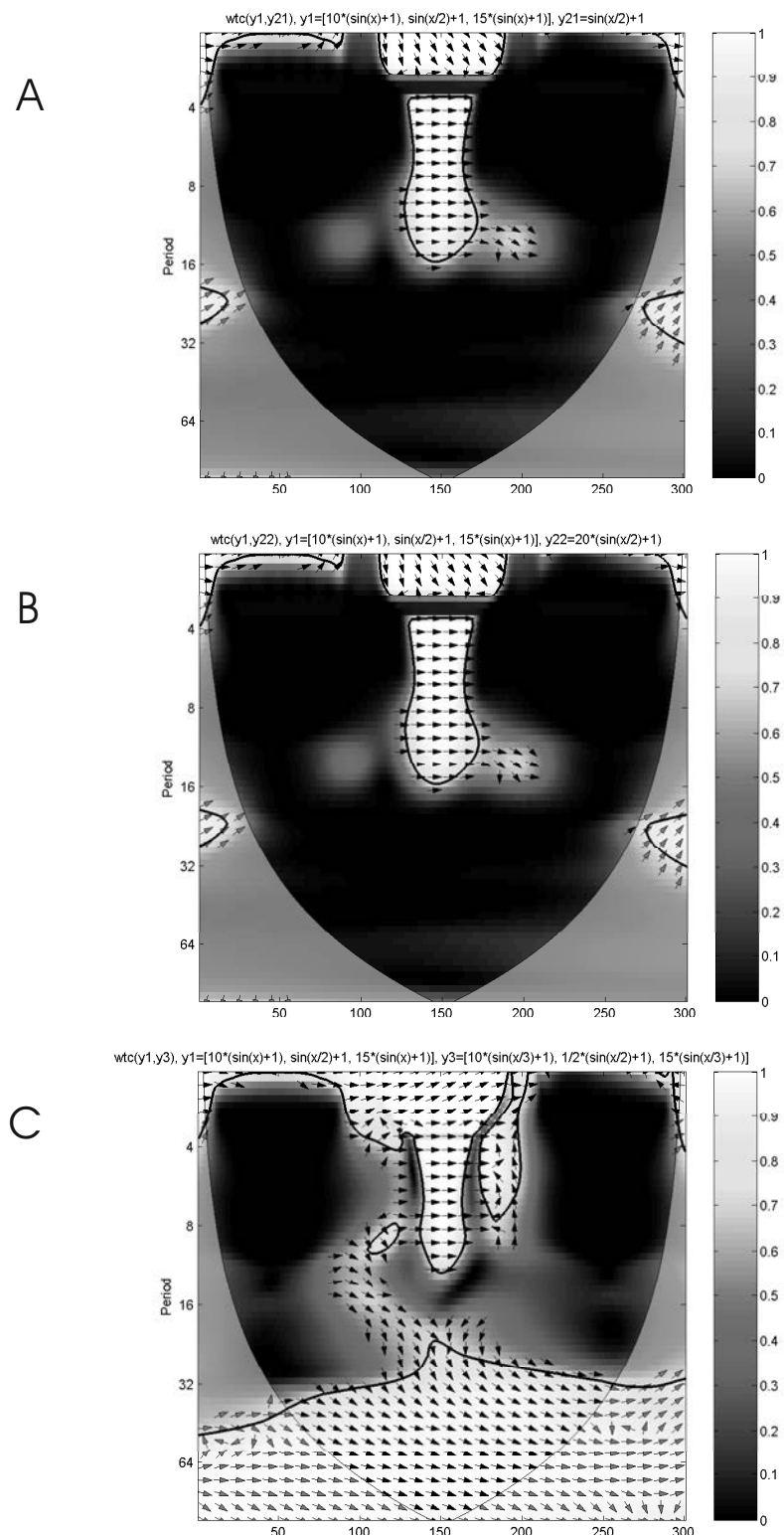


Рис. 1.8: **(A)**: Спектр вейвлет-когерентности и фаз *sin*-функции (Рис. 1.7(A)) с *sin*-функцией (Рис. 1.7 (B)); **(B)**: спектр вейвлет-когерентности и фаз *sin*-функции (Рис. 1.7 (A)) с *sin*-функцией (Рис. 1.7 (B)), но с в 20 раз большей амплитудой; **(C)**: спектр вейвлет-когерентности и фаз *sin*-функции (Рис. 1.7 (A)) с *sin*-функцией (Рис. 1.7 (C)).

## 1.2 Метод разложения по эмпирическим модам (Empirical Mode Decomposition, EMD)

Ввиду того, что ряды не тестовых, а реальных данных являются, как правило, сильно зашумлёнными — с одной стороны, и содержащими, подчас, колебания не на одной лишь частоте, а на нескольких частотах — с другой, анализ ряда в целом может не дать чётких результатов или же отразить наиболее яркие колебания. Содержащиеся в ряде сигналы могут появляться, пропадать и снова возникать через какое-то время, либо может просто увеличиваться и уменьшаться амплитуда, а при исследовании ряда целиком не всегда возможно интерпретировать наверняка, какой именно из этих процессов имеет место.

Для разрешения этой проблемы и подходит метод разложения по эмпирическим модам (Empirical Mode Decomposition, EMD). Этот метод является эмпирическим, и основной его принцип заключается в том, что для исследуемого сигнала  $x(t)$  ищется разложение на более простые сигналы (моды):

$$x(t) = m_K[x](t) + \sum_{k=1}^K d_k[x](t), \quad (1.8)$$

где  $d_k(t)$  — амплитуда  $k$ -ой моды. Каждая полученная мода имеет математический смысл. Если рассматриваются реальные, природные ряды, то возникает вопрос о том, какой физический смысл может нести каждая выделенная мода. В этом случае применение метода разложения по эмпирическим модам, действительно, позволяет выделить реальные, физические сигналы, содержащиеся в исходном ряде, но скрытые среди сигналов на других частотах, а также убирать тренды и более длиннопериодные или короткопериодные вариации, нежели те, которые исследуются.

Эффективный алгоритм EMD-метода может быть сведён к следующей схеме:

1. ищутся экстремумы  $x(t)$ ;
2. строятся две огибающие, интерполирующие минимумы ( $e_{min}(t)$ ) - “нижняя” огибающая, и максимумы ( $e_{max}(t)$ ) - “верхняя” огибающая;
3. вычисляются средние значения:

$$m(t) = \frac{(e_{min}(t) + e_{max}(t))}{2}; \quad (1.9)$$

4. вычисляются разности:

$$d(t) = x(t) - m(t); \quad (1.10)$$

5. для получившейся кривой более низкочастотных вариаций  $d(t)$  алгоритм повторяется с самого начала, с вычисления новой кривой  $m(t)$ .

Разложение исходного ряда на более простые моды позволяет очистить ряд от шумов и исключить тренд [78], а также проследить эволюцию гармоник, соответствующих разным частотам. EMD-метод в этом случае служит своего рода фильтром.

Одно из отличий, являющееся преимуществом, EMD-метода от вейвлет-анализа состоит в том, что EMD — эмпирический метод. Как видно из алгоритма, набор мод, базис, получается непосредственно из анализируемого сигнала. В вейвлет-преобразовании же заранее задаётся базисный (материнский) вейвлет.

Иллюстрации к данному Разделу демонстрируют разложение по эмпирическим гармоникам трёх тестовых рядов данных: периодической функции  $\sin(x)$  — Рис. 1.9 (А), нормального распределения — Рис. 1.9 (В) и ряда, полученного суммированием периодической функции  $\sin(x)$  и нормального распределения — Рис. 1.10. Графики и вейвлет-спектры используемых синусоидальной функции и нормального распределения представлены на Рис. 1.5(А,В) и Рис. 1.5(Е,Ф), соответственно.

На приведённых иллюстрациях видны моды сигналов: от высокочастотных до трендов. По характеру появления мод определённой частоты можно проследить эволюцию данной моды.

В случае функции  $\sin(x)$  (Рис. 1.5(А)) разложение по эмпирическим модам дало следующий результат Рис. 1.9 (А): мода  $k = 1$  отражает частоту колебаний  $\sin(x)$ , которая чётко видна в вейвлет-спектре исходной функции на Рис. 1.5(В); а моды  $k = 2, 3, 4, 5, 6$  отражают периодичности функции, кратные основной ( $k = 1$ ). Картина именно такая ввиду того, что рассматриваемая функция именно синусоида. Однако, для нормального распределения, в котором представлен широкий спектр частот, картина меняется. Хотя спектр частот и широк, но, как правило, они очень неустойчивы. Результат разложения по эмпирическим модам ряда нормального распределения представлен на Рис. 1.9(В). В отличие от строго периодической синусоидальной функции, моды нормального распределения представляют собой кривые с изменяющейся амплитудой, и выделенные частоты, которым эти моды соответствуют, менее стационарны.

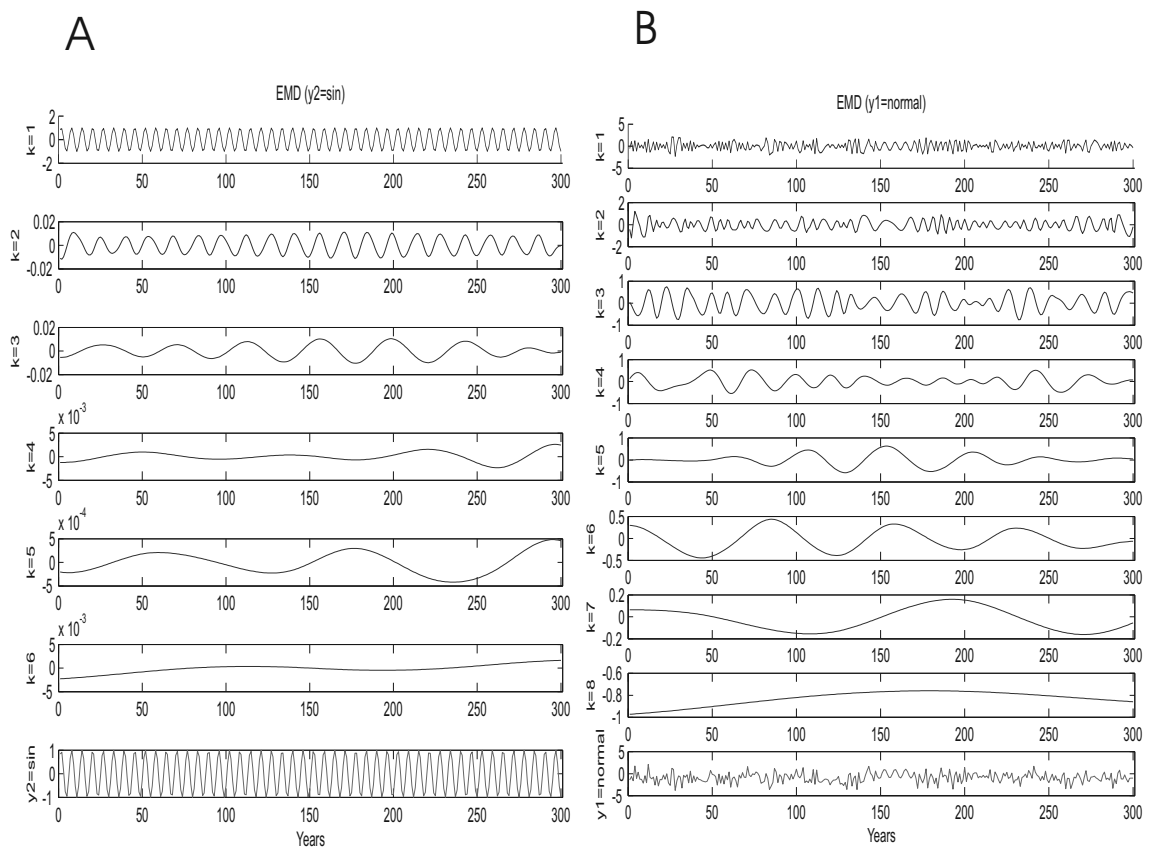


Рис. 1.9: Результат разложения по эмпирическим модам синусоидальной функции (А) и ряда нормального распределения (В), представленных на Рис. 1.3(А) и Рис. 1.3(Е), соответственно.

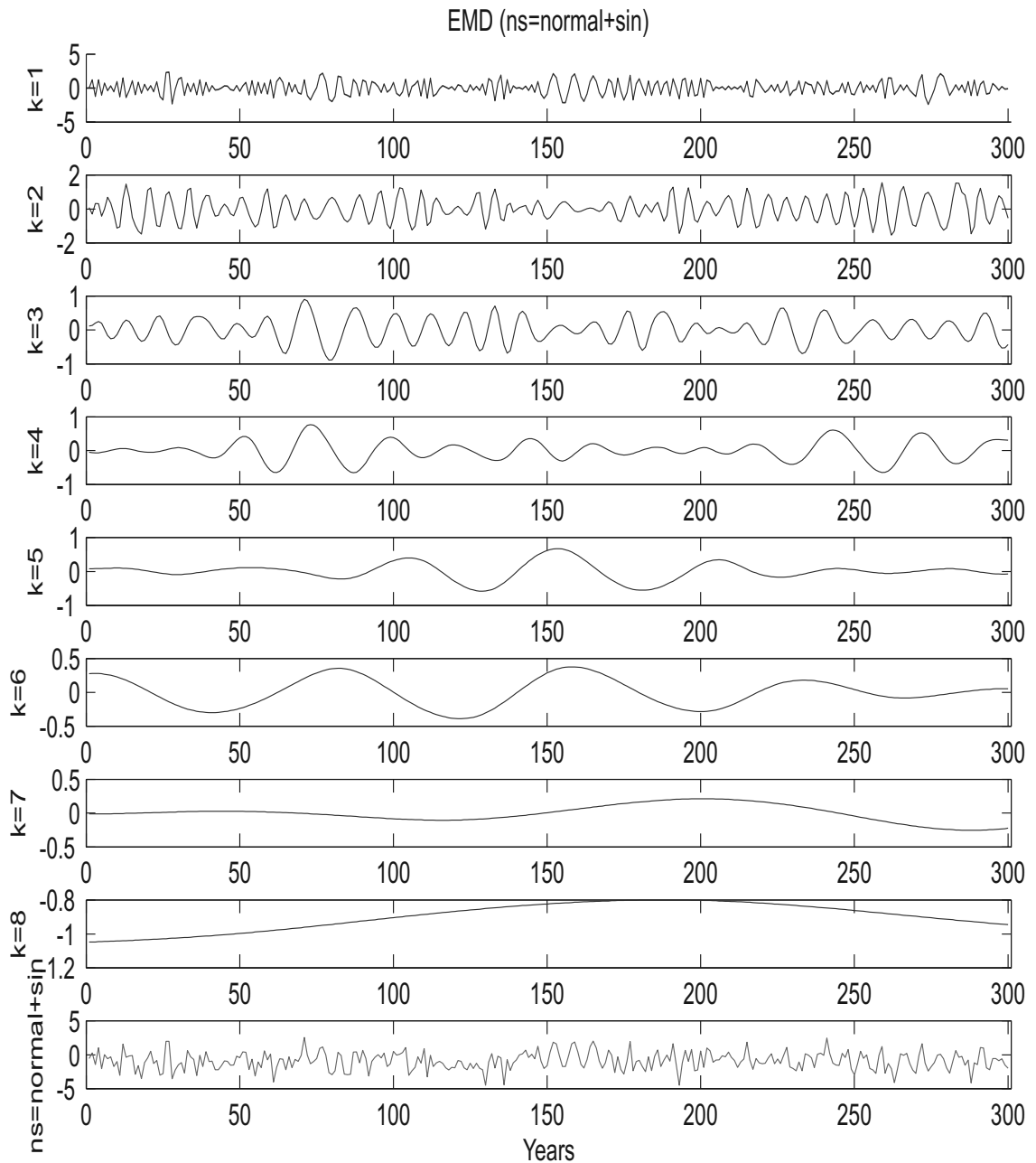


Рис. 1.10: Результат разложения по эмпирическим модам ряда, полученного путём суммирования нормального распределения и синусоидальной функции, представленных на Рис. 1.3(Е) и Рис. 1.3(А), соответственно.



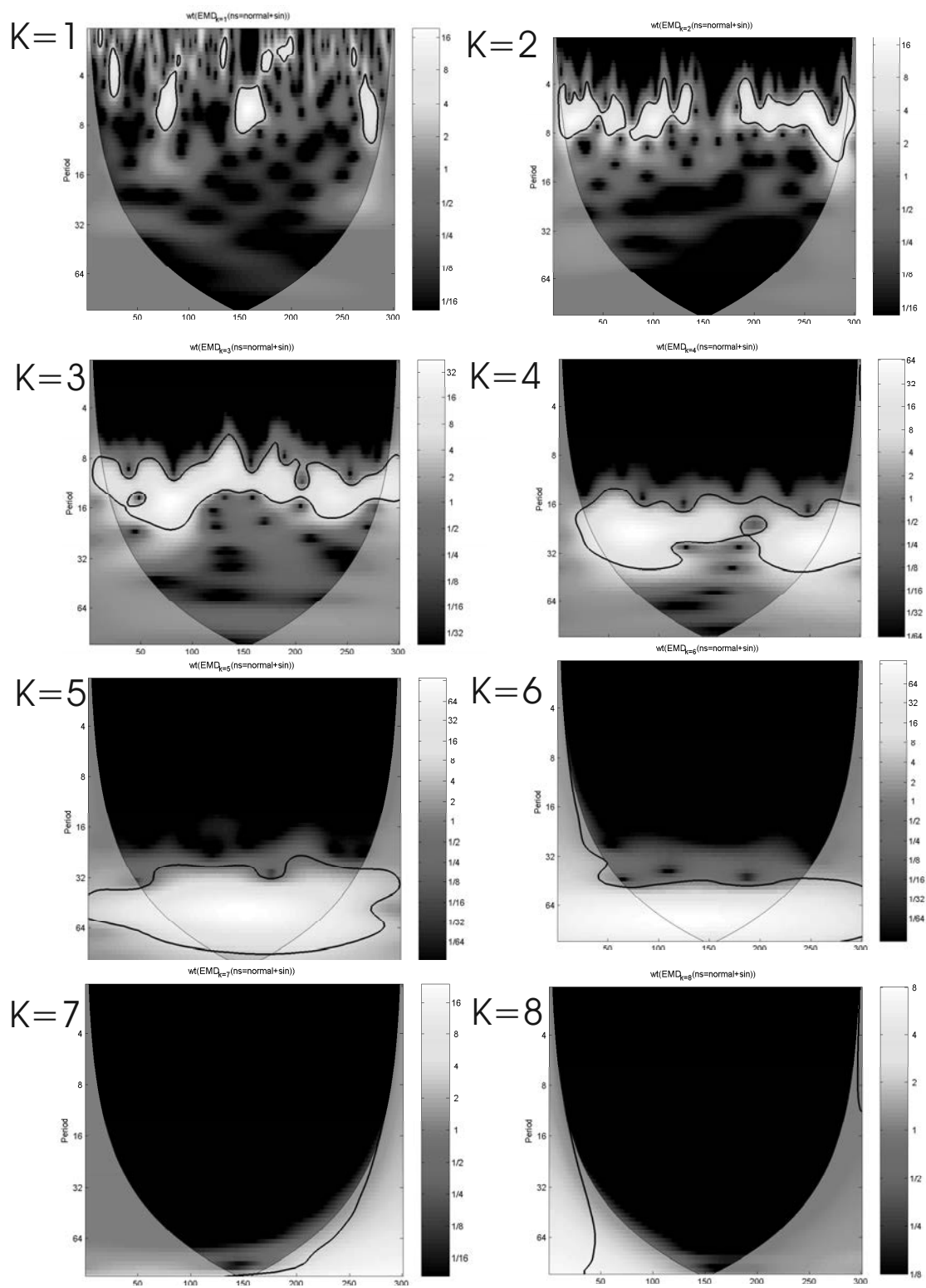


Рис. 1.11: Вейвлет-спектры мод, полученных в результате разложения по эмпирическим модам ряда, представленного на Рис. 1.10 (E,F) полученного путём суммирования нормального распределения и синусоидальной функции.

Для того, чтобы исследовать эволюцию какой-либо гармонике с течением времени, её возникновение, исчезновения и снова появления, можно применять EMD-метод в совокупности с другими методами анализа рядов данных [154]. Например, эффективным представляется применение вейвлет-анализа и его модификаций (см. Раздел 1.1) к отдельным исследуемым модам, что и было сделано в данной диссертации в Главе 2.2. То есть, имеет смысл применять к исходному ряду метод разложения по эмпирическим модам, а после – к уже выделенным модам – вейвлет-анализ и его модификации.

EMD-метод подробно описан в работе [103]. Кроме того, примеры применения данного метода наряду с обсуждением возможностей и комбинаций с другими методами можно найти в работах [57], [58], [77], [78], [154], [258] и [270].

## Глава 2

# Вариации климата

Данная Глава посвящена краткому обзору работ в области исследования климатических вариаций, современной классификации наблюдаемых в климате цикличностей и их наиболее вероятным объяснениям, а также обсуждению результатов исследования вариаций среднегодовых глобальных значений приземной температуры воздуха.

### 2.1 Введение к Главе 2

Климат Земли как сложная пространственно-распределенная динамическая система испытывает колебания в широком диапазоне временных масштабов [15]. Порождаются ли эти, часто нестационарные, транзиентные колебания самой климатической системой или обусловлены внешним воздействием, до сих пор четко не установлено [93].

#### 2.1.1 Исследования колебаний климата и возможности их обусловленности внешними причинами

В современной климатологии одним из многочисленных направлений является выявление и исследование цикличностей в климате. Как уже говорилось выше, причины колебаний климата и наблюдаемых в климатических параметрах трендов могут быть разными, и далеко не для всех периодичностей они установлены однозначно. Зачастую этот вопрос является предметом споров. Некоторые авторы, опираясь на проведенные исследования, делают выводы о независимом от внешних факторов поведении климатической системы, другие же — делают выводы о воздействии внешних параметров на климат, как о причине некоторых из наблюдаемых колебаний и трендов.

Особенно много дискуссий возникает, когда речь заходит о таком внешнем факторе, как **солнечная активность**. Позиция приверженцев первой точки

зрения, в данном случае о *независимости климатической системы от вариаций космических, в частности, солнечных, параметров*, является весьма обоснованной хотя бы по той причине, что климат сам по себе является системой, в которой имеется множество факторов, участвующих в формировании глобального и региональных климатов, погоды. Среди них есть как более или менее постоянные факторы — например, рельефы океанического дна: в работе [140] отмечается воздействие гидрографии Северной Атлантики на зимние температуры Центральной Европы, в частности, на Альпийскую зону, за последние 9000 лет (реконструкция температурного ряда по данным о сталагмитах), — так и очень мощные динамические процессы: к примеру, циклоническая активность. На их фоне вариации того же Полного Солнечного Излучения (Total Solar Irradiance, TSI), составляющее порядка 0.1% от среднего уровня, ничтожно малы по сравнению, например, с такими мощными факторами, как вулканическая деятельность и циклогенез, а также динамика атмосферы и системы атмосфера-океан-суша. Сторонники же второй точки зрения, в данном случае, о *подверженности климатической системы воздействию вариаций солнечных факторов*, имеют свои обоснования: конечно, вариации такого внешнего по отношению к Земле фактора, как солнечная активность, составляют очень малую величину, но возможно не только прямое и мгновенное воздействие одного процесса на другой — вполне может иметь место опосредованное воздействие, например, триггерный либо накопительный эффекты, а также обусловленность лишь некоторых вариаций климата таким слабым солнечным воздействием.

В пользу того, что солнечное воздействие на климат на длинных периодах имеет-таки место, говорит работа [49], авторы которой установили, что за рассмотренный ими интервал времени (со второй половины XX столетия до начала XXI: 1959-2004 гг., эпоха глобального потепления) приземная температура воздуха в годы высокой солнечной активности в 11-летних циклах приблизительно на 0.2 К выше, чем в годы низкой солнечной активности. Авторами [49] также была проанализирована разность температур в годы максимумов и в годы минимумов с целью изучить географическое распределение климатических зон, наиболее “чувствительных” к воздействию 11-летних вариаций солнечной активности. В результате исследования было установлено, что регионы, наиболее “чувствительные” к солнечному воздействию, находятся в высоких широтах. В случае, если предположить, что климат откликается на вариации солнечной активности благодаря вариациям интенсивности потоков космических лучей, сам факт нахождения “чувствительных” к солнечному воздействию климатических зон в высоких широтах уже говорит в

пользу влияния цикличностей солнечной активности на климат. Но не стоит исключать возможность случайного совпадения частот в двух независимых процессах — в вариациях солнечной активности и во внутренних колебаниях климата. С другой стороны, если вариации климатических параметров на частотах, близких к солнечным, наблюдаются в средних или низких широтах, то это не доказывает того, что имеет место лишь случайное совпадение: немаловажную роль может играть динамика атмосферы и океана, посредством которой солнечный сигнал может трансформироваться и переноситься по планете, вследствие чего величины фаз наблюдаемой когерентности могут меняться. И, естественно, наиболее важным представляется то, какая физическая причина, какой физический механизм может стоять за наблюдаемыми когерентностями: это то, что играет, пожалуй, решающую роль при попытке ответить на вопрос, действительно ли имеет место физическое воздействие, а не случайное совпадение. При исследовании связей одного процесса с другим важно как наличие когерентности, так и наблюдаемое при этом между ними фазовое соотношение. Кроме того, если когерентность наблюдается, то это говорит и о том, что форма сигналов в исследуемых системах схожая. Поэтому сам по себе факт наличия когерентности говорит в пользу того, что имеет место влияние одного процесса на другой, тем более при рассмотрении таких сложных систем, как Солнце, вулканизм, атмосфера, океан и климат: здесь “случайное” совпадение форм сигналов в разных системах представляется маловероятным, но возможным, что и обсуждается подробно в следующих Главах. Что касается фазовых соотношений, то, как отмечалось выше, в случае такой динамичной системы, как климат, фазовые соотношения подчас могут меняться по внутренним климатическим причинам.

В работе [197] исследуются периодичности, наблюдаемые в климате Российского побережья Арктики (реконструкция по кольцам деревьев) и солнечной активности (реконструкция по  $^{14}\text{C}$ ). Были выявлены периодичности длиной 20-25 лет на протяжении интервала времени с 1458 по 1975 гг. Кроме того, наблюдалась некоторая особенность: во время Минимума Маундера продолжительность наблюдаемых в климате вариаций длиной в 22-23 года увеличилась до 24-29 лет, а также появились вариации с длиной периода порядка 15-16 лет. Авторами [197] выдвигается гипотеза о том, что наблюдаемый в климате квази-22-летний сигнал является результатом усиления слабого солнечного 22-летнего сигнала в системе атмосфера-океан, имеющей свой собственный шум, период которого близок к солнечной периодичности и составляет приблизительно 22-23 года.

Интересно отметить, что существует ряд исторических примеров, гово-

рящих в пользу того, что отражение длиннопериодных вариаций солнечной активности в климате Земли в действительности имеет место.

Например, одним из любопытных примеров может быть работа [47], которая посвящена очень интересному вопросу, касающемуся не только сферы физики, но и сферы искусства, точнее, музыки. Эта работа посвящена вопросу связи таких, казалось бы, независимых явлений, как звучание “скрипки Страдивари” — с одной стороны, и Минимум Маундера солнечной активности — с другой. Не вызывает сомнения бесподобность звучания скрипок работы известного средневекового мастера Антонио Страдивари. Как известно, разгадкой секрета его мастерства — возможность использования какого-либо раствора при обработке древесины, возможность того, что “работа” какого-то древесного червя могла сказаться на последующем звучании скрипки, и так далее — занимаются и в наше время. Авторы же [47] производят сопоставление времени творчества мастера, а также особенностей технологии производства скрипок, информации о древесном материале, необходимом для этого, с кривой вариаций солнечной активности. Полученный результат состоит в том, что деревья, из которых впоследствии были сделаны скрипки, росли во время Минимума Маундера солнечной активности. А поскольку климат отражается на росте деревьев и свойстве древесины, то по предположению авторов [47], это может говорить о том, что бесподобное звучание скрипок авторства Страдивари отчасти обязано похолоданию, предположительно вызванному Минимумом Маундера солнечной активности.

Другим историческим свидетельством возможно неслучайного совпадения являются документальные свидетельства о колебаниях цен на шерсть в Средневековой Европе, в частности — в Средневековой Англии. Авторы [190] показывают, что в годы рассмотренных 10 минимумов солнечной активности цены на шерсть были выше, чем в годы рассмотренных 10 максимумов солнечной активности. Так как уровень цен на любой товар связан с количеством, качеством и сложностью производства этого товара, то из приведённого примера сам собой напрашивается вывод о том, что цены на шерсть связаны с количеством и качеством этой шерсти. И тот факт, что цены коррелируют с экстремумами солнечной активности, может говорить о том, что солнечная активность коррелирует с климатом.

Стоит заметить, что возможен ещё третий, промежуточный, вариант: *вариации солнечных параметров воздействуют на состояние нижней атмосферы Земли опосредованно*, а именно: вариации внешних параметров сказываются лишь на некоторых, наиболее чувствительных к внешним воздействиям и в то же время очень мощных, климатических процессах, а те, в свою

очередь, влияют на другие климатические параметры, например, приземную температуру воздуха. Примером такого мощного климатического процесса может служить Северо-Атлантическая Осцилляция (North-Atlantic Oscillation, *NAO*). *NAO* определяется как разница атмосферного давления над уровнем моря между областью низкого давления в Исландии (Icelandic Low) и областью высокого давления на Азорских островах (Azores High). Примерами климатических процессов, на которых сказывается *NAO*, могут служить, например, ветра и шторма в Северной Атлантике. *NAO* играет одну из ведущих ролей в формировании климата Северной Атлантики. Воздействие *NAO* может сказываться на климате Европы, достигая широт Южной Европы и Северной Африки. В работе [42] по результатам моделирования исследуется воздействие *NAO* на климат Европы, в особенности, на температуру и осадки. Изучается характер отклика в зависимости от топологических особенностей и сложившихся климатических условий в рассматриваемых регионах. Что касается температурных изменений, то в данном случае *NAO* может послужить посредником выстраивающейся таким образом “цепочки воздействия”, одним из финальных звеньев которой может быть приземная температура воздуха в Северной, Западной и даже Южной Европе. То, как именно и в какой степени *NAO* сказывается на региональных климатах Европы, также является предметом исследований. Например, автор [50, 51], исследуя тренды в сезонных значениях температур и осадков для Северной Атлантики, Европы и Альпийской зоны приходит к ряду заключений о воздействии Северо-Атлантической Осцилляции на климат Европы. Одним из важных выводов является то, что Альпийская зона является “границей” влияния Северо-Атлантической осцилляции.

Некоей “антиподальностью” в географическом смысле можно назвать явление *El-Niño*, ENSO (*El-Niño* Southern Oscillation, Тихоокеанская Южная Осцилляция). Это — разница атмосферного давления между Таити и Дарвин (Австралия), обусловленная нагреванием приповерхностных вод Восточной части Тихого океана, длящимся от трёх до восьми лет. *ENSO* оказывает влияние на многие климатические параметры. Например, авторы [73] обсуждают воздействие ENSO на осадки в США. Однако, возможен и противоположный эффект: как показывают авторы [246] в своей работе, рост температуры воздуха в ходе глобального потепления сказывается на частоте возникновения Эль-Ниньо.

Автор [46] строит схему воздействия на Индийские муссоны и Глобальную Температуру поверхности океанов (Global Sea-Surface Temperature, *SST<sub>Global</sub>*) таких явлений как *El-Niño* и *NAO*, которые, в свою очередь, подвержены

воздействию вариаций геомагнитной активности через изменение теплового баланса атмосферы, перераспределение атмосферного давления.

Автором работы [245] было установлено, что в приповерхностной температуре Северной Америки и в НАО наблюдаются схожие декадные вариации, причём оба сигнала соответствуют некоему пространственному паттерну охлаждения и нагревания.

Авторы [192] на основе исследования климатических рядов Загреба заключают, что за период с 1862 по 2002 год причиной длиннопериодных вариаций температур является глобальная атмосферная циркуляция и облачность.

Что касается возможности воздействия на климат Земли такого фактора, как **вулканизм**, то в этом случае, в отличие от вопроса о воздействии на климат солнечной активности, споров возникает меньше ввиду того, что вулканическая деятельность является очень мощным процессом. В зависимости от интенсивности извержения, его последствия могут проявляться как в нижней атмосфере, так и гораздо выше — в стратосфере. Само по себе вулканическое извержение отражается на состоянии атмосферы даже тогда, когда речь идёт о не очень сильном извержении — тогда последствия очень слабы: изменения в атмосфере не очень значительны, прослеживаются до небольших высот, непродолжительны по времени и сильно пространственно локализованы местонахождением вулкана. Вследствие вулканического извержения может нарушиться радиационный, температурный баланс атмосферы, и это нарушение может длиться годами — в зависимости от интенсивности извержения. Стратосферные вулканические извержения вызывают не только локальные, но и глобальные последствия в атмосфере (см. Раздел 4.1.3). Особенно много исследований проводится по проблеме воздействия на климат отдельных вулканических извержений. Исследуются глобальный и локальные отклики. В случае исследования длиннопериодного воздействия на климат речь может идти преимущественно о квази-периодичностях, возникающих спонтанно вследствие усиления или же ослабления вулканической активности, в совокупности с последствиями особенно интенсивных вулканических извержений, имеющих долговременное воздействие на атмосферу Земли (Раздел 4.1.3). Однако, вопрос о том, действительно ли отдельные вулканические извержения воздействуют на климат, по-прежнему остаётся открытым. К примеру, авторы работы [39] полагают на основании своих исследований, что климатические осцилляции порядка 70 лет могут быть вызваны вулканизмом. В работе же [218] авторы говорят о своём несогласии с этим выводом [39] и отстаивают другое мнение — осцилляции климата не могут быть вызваны такими случайными событиями, как вулканические из-



вержения. Вышеупомянутый вывод работы [39] не является единственным: по мнению авторов [39], очень низкий уровень вулканизма в 1925-1960 гг. может (хотя бы частично) послужить причиной потепления (тренда) в климате в этот период времени. Авторами затрагивается вопрос о причинах векового тренда в климате — они выдвигают предположение о том, что он мог быть вызван комбинированным воздействием Солнца и вулканов, но эта причина, однако, не может послужить объяснением резкого роста температуры во второй половине XX столетия, особенно после 1970-х гг.

Автор [80] обнаружил в ряде глобальной температуры компоненты, соответствующие колебаниям *ENSO*, а также сигналы от таких вулканических извержений, как Эль-Чичон (1982) и Пинатубо (1991).

Некоторые авторы на основании своих исследований не соглашаются с точкой зрения, что солнечное или даже вулканическое воздействие на климат вообще имеет место — по крайней мере, с тем, что оно имеет место во всех регионах планеты. Например, авторы [50, 51] приходят к выводу о том, что на европейских паттернах как сравнительно небольшие (по отношению к такой сложной системе как климат) вариации солнечной активности, так и такое мощное явление, как вулканическая активность, не отразились. Авторы [139], напротив, на основе анализа реконструированного по данным о сталагмитах ( $\delta^{18}O$ ) ряда температуры воздуха в Альпах за 2000 лет, делают вывод о наличии существенного воздействия на Европейский климат солнечной активности на протяжении всего исследуемого ими (2000 лет) интервала времени.

### 2.1.2 Климатические циклы и их возможные причины

В работе [15], авторами (климатологами) произведена классификация известных климатических циклов с обсуждением возможных их причин. Авторы [15] выделяют следующие циклы:

- **Годичные циклы.** Вызваны сезонными перераспределениями воздушных масс над океанами и континентами. При этом над континентами происходит образование и разрушение сезонных центров действия атмосферы (ЦДА). Кроме того, согласно высокоточным измерениям Международной службы широты, на спектрах малых колебаний климата кроме узкого и мощного пика на годичном периоде имеется более слабый и широкий максимум около периода в среднем около 1.19 года, соответствующий чандлеровским колебаниям полюсов.

- **Квазидвухлетние циклы.** Согласно гипотезе А. М. Обухова эти колебания находятся в состоянии параметрического резонанса с годовыми колебаниями. Однако, данные наблюдений свидетельствуют о том, что на самом деле эти колебания происходят на периоде не 2 года, что предполагает условие для резонанса в уравнении типа Матье, а несколько большем, очень часто — 2.38 года. Они усиливаются, порождая так называемый квазидвухлетний климатический цикл колебаний атмосферной циркуляции. Механизм квазидвухлетнего климатического цикла ещё окончательно не ясен, однако, предположительно, он связан с особыми бифуркациями инвариантных торов в фазовом пространстве климатической системы, вызванными, в свою очередь, внешним воздействием на климатическую систему сил с другими, не годовыми, периодами. Среди возможных кандидатов на такие силы можно указать чандлеровское колебание полюсов, возбуждающее в атмосфере и океанах полюсный прилив, который может взаимодействовать с сезонными климатическими колебаниями. Также могут быть важны взаимодействия годового цикла с долгопериодными биениями лунно-солнечных приливных воздействий на климатическую систему.
- **Квазидвадцатилетние циклы.** В спектрах климатических рядов часто наблюдается сигнал с периодичностью 23.7 года — “удвоенный” цикл или цикл Хейла солнечного происхождения. По мнению авторов [15], солнечный цикл Швабе длиной в среднем 11.86 года выражен слабо или вообще отсутствует в климатических рядах именно потому, что наиболее “физичным” является магнитный цикл солнечной активности, отражающий не только изменение количественных значений магнитной активности солнечных пятен, но и смену знаков полярности магнитного поля ведущих солнечных пятен групп пятен. Поэтому, как считают авторы [15], именно магнитный цикл Хейла, а не “половинчатый” цикл Швабе, может быть замечен в климате. В работе же [245] рассматривается вопрос о статистической значимости декадных вариаций приземной температуры воздуха и исследуется географическое распределение наличия статистически-значимого сигнала. Авторы делают вывод о том, что сигнал наблюдается в Северной Америке. Также предполагается связь сигнала с вариациями солнечной активности и Северо-Атлантической осцилляцией.
- **Главный цикл Солнечной системы.** По мнению авторов [15], мультидекадные климатические циклы могут быть связаны с главным циклом

Солнечной системы, в котором приблизительно повторяется взаиморасположение трёх главных тел Солнечной системы: Солнца, Юпитера и Сатурна, что вносит основной вклад в определение центра инерции Солнечной системы. Грубо говоря, длительность этого цикла должна быть близка к общему наименьшему кратному из периодов обращения Юпитера и Сатурна, округлённые значения которых равны, соответственно, 12 и 30 годам. Таким образом, главный цикл Солнечной системы приблизительно равняется утроенному циклу магнитной активности Солнца (циклу Хейла).

- **Главный цикл Голоцена.** Из анализа палеоклиматических данных можно выявить наличие межвековых климатических циклов [15]. И хотя, например, проявляющийся 1500-летний цикл на самом деле является артефактом, вызванным наличием в календаре високосных лет и требующим пересчёта, но тысячелетние циклы всё-таки выделяются в Голоцене при вейвлет-анализе палеоклиматических рядов. В вейвлет-спектрах наблюдаются признаки амплитудной и частотной модуляции с периодами порядка тысячелетия. При этом модулируемыми служат гораздо более короткопериодные климатические колебания, вероятно, являющиеся реакциями климатической системы на вышеуказанные внешние воздействия с периодами в десятки и сотни лет. Природа таких вариаций может быть связана как с внешним воздействием (например, с главным циклом Солнечной системы, в котором по косвенным (весьма ненадёжным и неточным) данным тысячелетний цикл прослеживается), так и с чисто климатическими процессами (междувековые вариации глобальной “конвейерной” ленты термохалинной циркуляции Мирового океана, вызванные опусканием холодно-солёных вод Атлантики и Антарктики и компенсирующим поднятием (апвеллингом) тёплых менее солёных вод в тропиках.)
- **Ледниковые циклы.** Оценки периодичностей ледниковых климатических циклов последней трети Плейстоцена были проведены по спектрам климатических рядов, полученных по измерениям в некоторых колонках океанских осадков. Выявленные колебания имеют периодичности 19-23 тыс., 41 тыс. и 100 тыс. лет. Астрономическая теория колебаний климата М. Миланковича объясняла ледниковые циклы как реакцию климатической системы на вариации инсоляции, создаваемые возмущениями орбитального движения Земли в Солнечной системе из-за гравитационных взаимодействий с другими планетами [15]. Расчёты в рамках небесной

механики показали, что в возмущениях инсоляции имеются такие же периодичности и являются, соответственно, прецессионными (19-23 тыс. лет), создаваемыми колебаниями наклона экватора к плоскости земной орбиты (41 тыс. лет), и колебаниями эксцентриситета орбиты (100 тыс. лет). И хотя вставал вопрос о достаточности силы возмущений поля инсоляции для того, чтобы вызвать ледниковые периоды, совпадение периодичностей говорит в пользу астрономической теории колебаний климата М. Миланковича. [15].

Декадная вариация всё-таки проявляется в климатических данных в различных климатических рядах, как на региональном, так и на глобальном уровне, но не везде и не всегда: автор [27], исследуя вариации глобальной температуры за 130 лет (работа 1994 года), не смог выделить из данных по глобальной приповерхностной температуре воздуха над сушей, кроме длиннопериодных колебаний, тренда, статистически-значимых над уровнем “красного” шума 11- или 22-летних колебаний, однако он обнаружил в данных по глобальной температуре приповерхностных вод океана квази-10-летние колебания в Экваториальной Атлантике и квази-3-5-летние — в Тихоокеанском регионе Эль-Ниньо. Но, если по многим экспериментальным климатическим данным и можно наблюдать квази-11-летнюю вариацию, то её природа всё еще является загадкой. Например, во второй половине XX-го века установлена близость данной климатической вариации к 11-летнему циклу солнечной активности [185], что может быть свидетельством повышенной чувствительности климатической системы на внешнее воздействие в условиях глобального потепления [186]. В то же время в ряде недавних работ ставится под сомнение солнечное происхождение декадной вариации [160], да и роль самой солнечной активности в глобальном потеплении [133].

Как уже говорилось выше, в начале этой Главы, изучение вариабельности климата и её причин является бурно развивающейся в настоящее время областью исследований.

Существует ряд работ, посвящённых исследованию вариабельности климата в отдельных географических зонах. Например, работа [25] посвящена исследованию вариабельности климата в Средиземноморском регионе с 1500 года, в работе [199] рассматриваются вариации климата Северной Атлантики, а в работе [232] — климатические вариации на Северо-Американском континенте. В работе [89] представлены весьма интересные результаты исследования, посвящённого определению наиболее вариабельных климатических зон, так называемых “climate change hot-spots”. Оценки вариабельности проводят-

ся при помощи региональных климатических моделей. Как показано автором [89], наиболее “изменчивыми” являются, например, регионы Европы, северной части Северной Америки, северных регионов Азии.

Работы [158, 54] и [55] посвящены исследованию variability приземной температуры Северного полушария на масштабах порядка 1000 лет. Автор [162] на основании анализа реконструированных за последние 2000 лет климатических данных приходит к выводу, что как солнечный, так и вулканический сигналы прослеживаются в температурных данных и таких климатических индексах как Северо-Атлантическая и Южно-Тихоокеанская Осцилляции. Авторы [3] обнаружили синхронность ледниковых циклов климата позднего Плейстоцена и инсоляции на экваторе. В [217] рассматриваются вариации климатических индексов в тропическом поясе Тихого океана в контексте значений их энтропии, характеризующей степень хаотичности, и прогнозируемости поведения.

Разными авторами предпринимаются попытки смоделировать декадные (и не только) колебания климата на базе внутренних климатических причин, без учёта внешних воздействий. Например, в работе [117] обсуждается построенная её авторами эвристическая модель декадной вариации в климате средних широт. Модель основывается на связанной динамике атмосферы и океана. Авторы [68] исследуют возможный механизм декадной Северо-Атлантической Осцилляции, базируясь на данных наблюдений атмосферы, океана, поверхностных морских льдов и ветров. Впрочем, такого рода модели вовсе не отмечают возможности, что учитываемые “по факту” осцилляции спровоцированы внешними воздействиями, если это воздействие — периодическое и более-менее постоянное, как, например, цикличности солнечной активности. Но такая модель не отразит спонтанно возникающих периодичностей, что бывает в случае вулканической активности. Вообще говоря, сопоставляя полученные моделированием кривые с имеющимися экспериментальными кривыми, можно увидеть временные интервалы, когда поведение модельной и экспериментальной кривых сильно отличается. Если все постоянно присутствующие климатические факторы учтены, то из получающейся разницы можно получить информацию о времени и степени воздействия спонтанных факторов, в том числе — вулканической активности, отдельных вулканических извержений. А учитывая, что вулканизм представляет собой очень мощное явление, время и степень воздействия вулканических извержений на климат могут быть явно видны из сопоставления кривых.

Но не все модели делаются, исходя из предположения, что климатическая система независима. Например, в работе [265] авторы моделируют (на базе

атмосферно-океанической климатической модели “ЕСНО\_G” с 1755 г.) вклад в изменения климата (наблюдаемое понижение температуры) вариаций Полной Светимости Солнца, вулканизма и  $CO_2$  во время Минимума Дальтона солнечной активности (1790-1830 гг.). В это время уровень солнечной активности был очень низким, уровень вулканизма — высоким, а уровень  $CO_2$  начал расти. Было установлено, что на глобальной температуре и температуре, средней по полушариям, более всего сказались вулканы (особенно во второй половине Минимума Дальтона). По регионам же влияние вулканизма оказалось менее заметно из-за variability региональных климатов.

### **2.1.3 Климатические изменения во второй половине XX века, глобальное потепление и его возможные причины**

Заметные изменения в поведении климатической системы во второй половине XX столетия являются предметом бурного обсуждения в контексте глобального потепления. Что интересно, существенные изменения наблюдаются в очень многих показателях. Например, в работе [31] авторами исследуются различные характеристики, отражающие глобальную атмосферную циркуляцию, и их изменения, “центрированные” относительно 1960 года. Среди рассмотренных авторами параметров — показатели Атлантической и Тихоокеанской циркуляции, тропические ливни (в Африке и Южной Америке), температура морских поверхностных вод (Sea Surface Temperature, *SST*), приземная температура воздуха в Гренландии и прибрежные льды Антарктического моря. Авторы работы [11] анализируют особенности глобального потепления в Сибири.

На основании исследований антропогенного воздействия на атмосферу считается, что причиной глобального потепления и изменений в климатической системе второй половины XX столетия является именно антропогенный фактор. Автор [259] считает ведущей в глобальном потеплении роль комбинированного воздействия парниковых газов и аэрозольных эмиссий, в отличие от нестационарного воздействия на климат вариаций солнечной активности и отдельных вулканических событий. Значительный рост температуры вызывает беспокойство во всём мире, смоделированные климатологами сценарии эволюции климата при современных показателях эмиссий в атмосферу парниковых газов — неутешительны: ожидается продолжение роста температуры воздуха, влекущего такие катастрофические для всей планеты последствия, как таяние полярных льдов и повышение уровня Мирового океана. Всё это стимулировало такие шаги в целях остановить или хотя бы замедлить глобаль-

ное потепление, как создание Киотского протокола, обязывающего ряд стран, подписавших его, регулировать промышленную деятельность и эмиссию в атмосферу парниковых газов в целях уменьшения парникового эффекта. Кроме того, Всемирная Метеорологическая Организация (ВМО) и Программа Организации Объединенных Наций по окружающей среде (ЮНЕП), признавая проблему потенциального глобального изменения климата, учредили в 1988 г. Межправительственную группу экспертов по изменению климата (МГЭИК) (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)). Она является открытой для всех стран-членов ООН и ВМО. Ежегодные отчёты МГЭИК включают информацию по климатическим изменениям за соответствующий год, оценки соблюдения Киотского протокола странами-участницами, а также предложения по дальнейшим действиям в области контроля и ограничения глобального потепления.

Однако, в ряде работ обсуждаются возможные естественные причины глобальных климатических изменений. Например, работа [248] посвящена обсуждению предположения о синхронизации таких климатических параметров, как Pacific Decadal Oscillation (*PDO*), North Atlantic Oscillation (*NAO*), *El Niño*/Southern Oscillation (*ENSO*), и North Pacific Oscillation (*NPO*) (как по данным наблюдений, так и на основании модельных оценок), как причины, ведущей к переходу климатической системы в другое статистическое состояние. По мнению авторов [248], глобальное потепление во второй половине XX столетия могло быть вызвано наложением одного на другой двух факторов: вышеописанной синхронизации, приведшей к переходу климатической системы в другое статистическое состояние, и антропогенного воздействия на климат, вызвавшего тренд потепления в температуре. В работе [158], затрагивающей вопрос variability приземной температуры Северного полушария на масштабах порядка 1000 лет, отмечается, что, согласно полученным для этого интервала времени реконструкциям температуры воздуха, в прошлом (приблизительно в 1000-1100 гг.) уже имели место значения температур воздуха, близкие к значениям второй половины XX столетия (1961-1990). Автор же [162] приходит к выводу, что потепление, наблюдаемое во второй половине XX столетия, является уникальным за последние 2000 лет. Оценки были сделаны по реконструированным температурным данным.

В работе [6] обсуждается возможность “быстрого” (в геологическом смысле) метанового потепления на границе Палеоцена и Эоцена (55 млн. лет назад). Выделение же метана из газовых гидратов, находящихся в недрах Земли, в современных условиях глобального потепления возможно. Однако, вызываемое этим потепление может идти гораздо быстрее, чем 55 млн. лет на-

зад засчёт дополнительных, появившихся в индустриальную эпоху, выбросов  $CO_2$  и  $CH_4$  в атмосферу Земли.

Авторы [28] на основании модельных расчётов делают вывод о невозможности объяснения наблюдаемого во второй половине XX столетия глобального потепления без учёта антропогенного фактора. Авторами [36] сделан ряд выводов, касающихся количественных оценок воздействия: по их оценкам, вклад воздействия солнечной активности в глобальное потепление за последние 140 лет составляет приблизительно 40%. В исследовании [62] рассматривается реконструкция климата на 1000 лет в прошлое. Авторы приходят к выводу, что в доиндустриальную эпоху можно объяснить наблюдаемые климатические вариации естественными причинами, а в индустриальную эпоху, после 1850 г., совокупностью естественных факторов и антропогенного воздействия. В работе [39] исследуется солнечное и вулканическое воздействие на климат: авторы приходят к выводу, что воздействием этих двух факторов может быть объяснён вековой климатический тренд, но не глобальное потепление XX столетия, особенно после 1970 г. Авторы отмечают, что лишь в 1920-1950 гг. низкий уровень вулканической активности может частично объяснить тренд потепления. Автор [60] (см. также комментарии и обсуждения в [32] и [61]) приходит к выводу, что до середины 1980-х гг. солнечное излучение (solar irradiance, SI) играло ключевую роль в воздействии на климат Земли.

По мнению авторов [81], вариации солнечной активности (светимости и  $U\Phi$ -излучения) сказываются на климате и играют роль в глобальном потеплении.

Авторы [223] исследуют воздействие солнечной активности и вулканических извержений на климат в доиндустриальную эпоху. В результате исследования был сделан вывод о том, что в вариациях глобальной приповерхностной температуры воздуха отражаются изменения обоих факторов, а на региональном уровне (рассматривалось Северное Полушарие) воздействие более сложно: вулканические извержения влияют на климат Земли на коротких интервалах времени (вызывая зимнее потепление), а на более длинных, включая декадные, интервалах — нет, по причине противоположного воздействия динамического и радиативного эффектов; солнечное же влияние на климат имеет место на длиннопериодных масштабах именно благодаря “взаимоусиливающему” фактору динамического и радиативного эффектов. Например, вариации климата во время Малого Ледникового Периода (периода глобального похолодания, наблюдаемого в XIV-XIX вв. в относительных значениях среднегодовых температур за последние примерно 2000 лет), вследствие сол-



нечного воздействия по такому принципу, схожи с наблюдаемыми.

В работе [224] рассматривается воздействие вулканической активности и изменений в потоках солнечного излучения на приповерхностную температуру воздуха в начале XX столетия. Авторы приходят к выводу, что в начале глобального потепления наблюдается роль обоих факторов, как Солнца, так и вулканов. Кроме того, авторами произведено сравнение результатов с использованием разных климатических моделей: в зависимости от модели, разные факторы (антропоген, Солнце или релаксация после вулканических извержений) могут быть переоценены или же, напротив, недооценены.

Работа [53] посвящена исследованию соотношений между геомагнитной активностью (*aa*-индекс) и глобальной приповерхностной температурой воздуха за 120 лет. Наблюдаемая корреляция была продлена в прошлое до эпохи Минимума Маундера. На основании полученных результатов авторы делают вывод о том, что с XVII века приповерхностная температура воздуха возросла благодаря воздействию солнечной активности примерно на  $0.7 - 1.5^{\circ}\text{C}$ .

Авторы [215] и [216] обсуждают вклад солнечной активности в вариации приповерхностной температуры воздуха в Северном Полушарии на основании построенной ими феноменологической модели кривой вариаций приповерхностной температуры воздуха в Северном Полушарии, индуцированной вариациями солнечной активности с 1600 г. По произведённым оценкам, в преиндустриальную эпоху (включая Минимум Маундера и Минимум Дальтона) наблюдается хорошее соответствие температурных модельной и реконструированной кривых. Кроме того, вклад вариаций солнечной активности в глобальное потепление составляет 50% или даже больше. Вкратце обсуждается похолодание в интервал времени начиная со “Средневекового Максимиума” (1100-1200 A.D.) и до минимума XVII века.

А в работе [34], посвящённой, преимущественно, исследованию климатических изменений во время Минимума Маундера, предполагается, что Солнце в глобальном потеплении XX века может играть роль бóльшую, чем антропоген. В работе [45] исследуется климат в Средние века. Авторы отмечают, что во время известного “Средневекового Максимиума” (1100-1200 A.D.) было также или даже теплее, чем в эпоху глобального потепления второй половины XX столетия. Стоит отметить, что интервал времени с 1100 по 1260 гг. A.D. отличалось очень высоким уровнем вулканизма. В это время во многих регионах наблюдались засухи, а где-то, напротив, шли сильные дожди. Имели место смены режимов (как при таких явлениях, как *La Niña* и *El Niño*). Авторы [63] исследуют прямое солнечное воздействие на состояние нижней атмосфере по модельным расчётам с проведением ряда численных

экспериментов. Результатом является вывод о том, что за наблюдаемое во время Минимума Дальтона похолодание ответственны солнечная активность и вулканические извержения. В соответствии с модельными расчётами, паттерны только в средних и высоких широтах сходны одному из экспериментов с учётом парниковых газов (Greenhouse Gases, GHG).

В работе [9] исследуется устойчивость аттракторов атмосферных моделей к постоянным внешним воздействиям и смоделирована реакция модельной климатической системы на малые внешние воздействия. В качестве примера малых воздействий рассмотрено изменение концентрации парниковых газов в атмосфере. Авторы же работ [17, 18] предпринимают попытку смоделировать и оценить степень воздействия на климат как антропогенного фактора, так и, например, вариаций солнечной активности. Было показано, что уже со второй половины XIX века модельная кривая с учётом воздействия солнечной активности, но без учёта антропогена отличается от соответствующей кривой с учётом антропогенного воздействия. Кроме того, в [17] отмечается, что в первой половине XX века вклад солнечной активности был заметный, причём дополнительный вклад в это потепление был за счёт ослабления вулканической деятельности. По оценкам, описанным в работе [17], в конце XX столетия вкладом вариаций солнечной активности может быть объяснена лишь одна четвёртая часть увеличения глобальной температуры.

В работе [269] проводится исследование климатических вариаций, полученных путём моделирования климата с помощью нейронных сетей. Авторами обсуждаются, в частности, полученные в результате моделирования сезонные и декадные вариации климата.

В ряде работ обсуждаются присутствующие в климатических данных периоды более или менее стабильного поведения климата. Исследуются возможные причины перехода климата из одного стабильного состояния в другое как некоей замкнутой системы или же под воздействием внешних процессов. Вопрос прогнозируемости климата затрагивается также в [176] — с точки зрения нелинейной динамики. Автор приходит к выводу, что поведение климатической системы переходит из одного стабильного состояния в другое. Однако, внешние воздействия — как антропогенное (увеличение уровня  $CO_2$  в атмосфере), так и природное (такие климатические явления, как, например, *El Niño*), — регулируют то, как именно климатическая система совершает эти “переходы”. Работа [134] посвящена попытке представления климатической системы как имеющей один или несколько аттракторов. В исследовании использовались климатические модели. Автор рассматривает климат, как систему, переходящую из одного стабильного состояния в другое, “стремясь”

к аттрактору, находящемуся в атмосфере. В [247] также обсуждаются атмосферные аттракторы, но в другом аспекте — в контексте идентификации ливней по наблюдениям со спутников.

Работа [229] содержит классификацию климатических циклов с точки зрения составляющих сигналов. В результате применения метода *EMD* авторы приходят к выводу, что на модах, наблюдающихся в климатических осцилляциях могли отразиться внешние факторы.

Предлагаемое исследование направлено на выявление степени влияния на климат таких внешних процессов, как солнечная и вулканическая активность. В работе выдвигается предположение о том, что причиной возникновения в климатических данных второй половины XX столетия декадной вариации является комбинированное воздействие на климат солнечной и вулканической деятельности. Основная часть исследования проводится на основании исследования приземной температуры воздуха — глобальной и по отдельным станциям.

## 2.2 Глобальная температура

Глобальная температура рассчитывается как среднее значение по выбранной сети метеорологических станций. Это может быть “частично-глобальная” температура для суши или для океанов, а также и более близкая к прямому пониманию смысла слова “глобальная” — глобальная температура, рассчитанная для сети станций, распределённых как на суше, так и (по возможности) в океанах. Кроме того, в климатических исследованиях часто используются данные по температурам для различных широтных поясов.

Являясь средней характеристикой, глобальная температура не отражает всех деталей поведения климата в регионах, но позволяет выявить некие общие тенденции синхронного поведения климатической системы в целом, а также выявить наличие глобальных периодических вариаций на определенных частотах. Интенсивность и устойчивость таких вариаций свидетельствует, в частности, о количестве метеорологических станций, содержащих данный сигнал: чем устойчивее и интенсивнее наблюдаемая в ряде глобальной температуры периодичность — тем больше среди числа станций, используемых при составлении ряда глобальной температуры, таких станций, в данных которых эта периодичность наблюдается. С другой стороны, отсутствие устойчивых периодичностей в вариациях глобальной температуры может говорить как о том, что таковые вообще не наблюдаются на статистически-значимом уровне, так и о том, что количество станций, где такие вариации

отсутствуют, значительно превышает число станций, где такие вариации присутствуют. Если исследование проводится с использованием вейвлет-анализа (Раздел 1.1), то значительную роль при интерпретации результатов играет соотношение амплитуд мод, содержащихся в анализируемом ряде данных (Раздел 1.1).

### 2.2.1 Экспериментальные данные

Существует несколько рядов глобальной температуры, полученных из данных сети метеорологических станций и наиболее часто используемых в климатических исследованиях [96]. Наиболее известными являются ряд базы данных *Climatic Research Unit (CRU) of the East Anglia University* (подготавливающего данные совместно с *Hadley Centre of the UK Met Office*) [113, 111], ряд базы данных *National Aeronautics and Space Administration - Goddard Institute for Space Studies (NASA-GISS)* [94, 95, 96] и ряд базы данных *National Climatic Data Center (NCDC)* [183, 191].

Следует отметить, что между рядами глобальной температуры *NASA-GISS*, *CRU* и *NCDC* существует несколько принципиальных различий в том, как именно эти данные были получены.

- Ряд *NASA-GISS* представляет собой аномалии относительно среднего значения глобальной температуры за 1951-1980 гг., ряд *CRU* — за 1961-1990 гг., а ряд *NCDC* — за 1901-2000.
- Набор станций, по которым рассчитывается глобальная температура, не один и тот же для *NASA-GISS*, *CRU* и *NCDC*.
- Ряд *NCDC* охватывает широты от  $90^{\circ}S$  до  $90^{\circ}N$ , *NASA-GISS* включает данные по станциям Арктики, а ряд *CRU* — нет.
- Предварительная обработка данных по станциям не идентична для разных баз данных [96]. Например, при построении ряда *NASA-GISS* можно отметить следующие особенности обработки исходных данных:
  - *качество данных*: выбирались станции, результаты замеров температуры на которых находились в пределах пяти стандартных отклонений от среднего значения для данного месяца, рассчитанного для количества лет, для которых имеются данные рассматриваемой станции; не учитывались станции, данные которых содержали сильные (более трёх стандартных отклонений) скачки; а также не рассматривались станции, содержащие большое количество случайных

данных, в частности, в начале записей станции: например, если 10 или более месяцев за 20 лет отличаются от среднего значения для каждого рассматриваемого месяца по данным имеющихся лет, более, чем на три стандартных отклонения;

- *вычет вклада факторов “неклиматического” происхождения*: при построении ряда *NASA-GISS* вводилась “поправка” на воздействие на атмосферу антропогенных факторов, дающих вклад “неклиматического” происхождения в получаемые путём замеров температурные данные, например, нагревание и охлаждение атмосферы вследствие жизнедеятельности больших городов и сельскохозяйственных работ, соответственно; учитывались технические изменения в используемых приборах;
- *однородность данных*: рассчитывалось значение для каждой из групп близко расположенных станций, чтобы создать более или менее однородную сеть данных для построения ряда глобальной температуры.

Автором данной работы был проведён сравнительный анализ аналогичных рядов данных по аномалиям приземной температуры воздуха из различных баз данных (*NASA-GISS*, *CRU* и *NCDC*). Для наглядности на Рис. 2.1 приведены спектры вейвлет-кросс-когерентности между разными рядами аномалий глобальной температуры воздуха, рассчитанных относительно аппроксимации полиномом 5-й степени — именно такие ряды анализируются далее в этой Главе, а также в Главе 4. Причины выбора именно такого типа аппроксимации подробно обсуждаются в Разделе 2.2.3. На Рис. 2.1 представлены спектры вейвлет-кросс-когерентности рядов: (A) — *NASA-GISS<sub>Land</sub>* и *CRU<sub>crutem3vgl</sub>*, (B) — *CRU<sub>crutem3vgl</sub>* и *NCDC<sub>Land</sub>*, (C) — *NASA-GISS<sub>Land</sub>* и *NCDC<sub>Land</sub>*.

Сравнение рядов аномалий приземной глобальной температуры воздуха *NASA-GISS* и *CRU* показало, что они когерентны практически на всех частотах, кроме соответствующих периодам менее 7 лет. Амплитуды спектра вейвлет-кросс-когерентности рядов *CRU* и *NCDC* малы и статистически-незначимы на 12-15-летней периодичности в 1960-1990 гг., на периодах короче 8 лет — в конце XX века, а также в нескольких случаях в XX столетии — на периодах менее 7 лет. Неустойчивее всего когерентность между рядами *NASA-GISS* и *NCDC*. В спектре наблюдаются продолжительные интервалы времени, когда статистически-значимой когерентности не наблюдается. Однако, было установлено, что характер наблюдаемых между глобальной

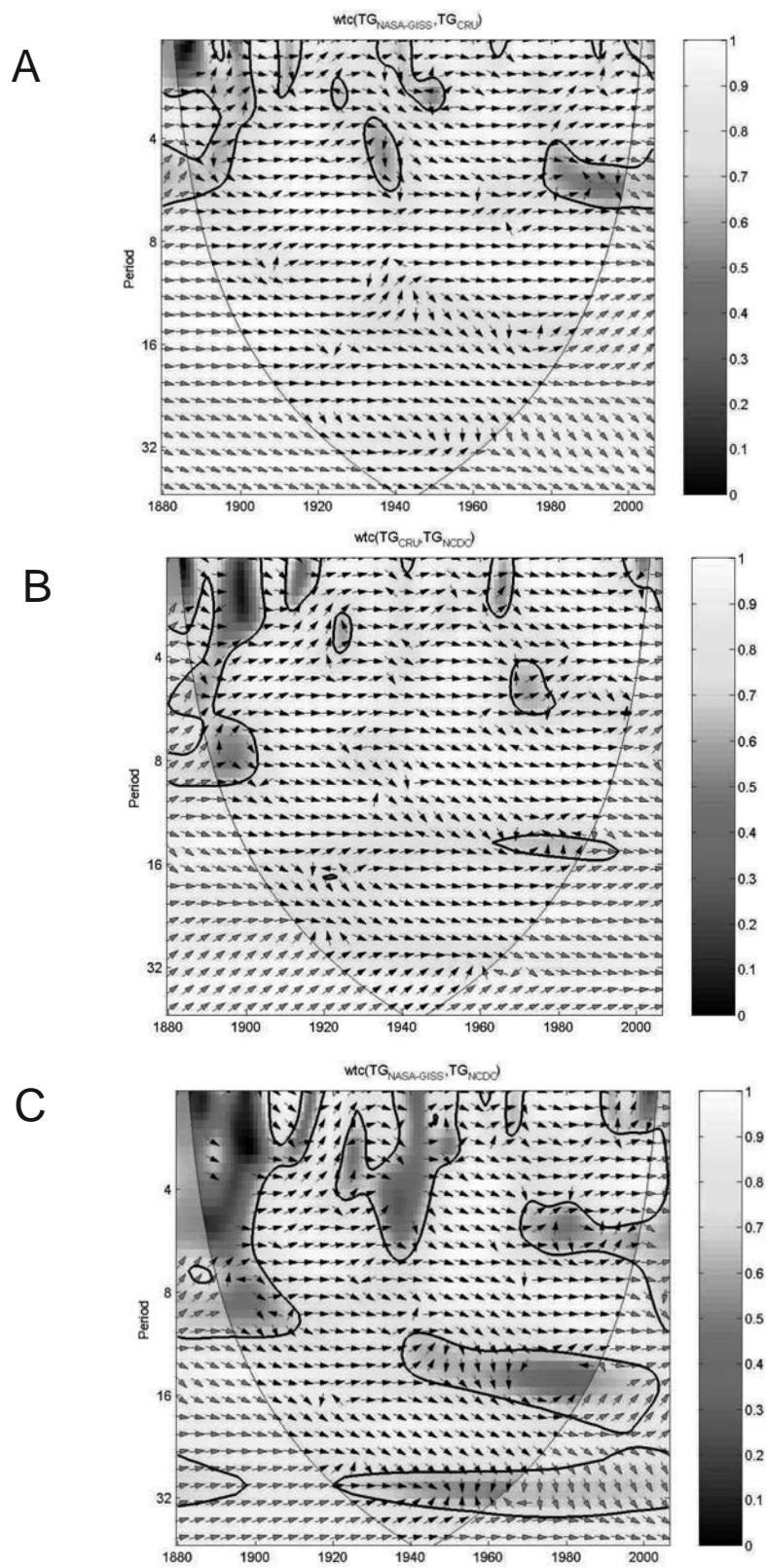


Рис. 2.1: Спектры вейвлет-кросс-когерентности рядов: (А):  $NASA-GISS_{Land}$  и  $CRU_{crutem3vgl}$ , (В):  $CRU_{crutem3vgl}$  и  $NCDC_{Land}$ , (С):  $NASA-GISS_{Land}$  и  $NCDC_{Land}$ .

температурой и внешними факторами когерентностей на квази-11-летней периодичности очень близок для различных рядов глобальной температуры. Наблюдаются общие тенденции, хотя и есть некоторые отличия, часто — в уровне статистической значимости результатов. Например, в случае рядов *NASA-GISS* и *CRU*, возможно, именно наличие станций по Арктике среди станций, используемых для расчёта глобальной температуры *NASA-GISS*, сыграло роль в том, что ряды *NASA-GISS* и *CRU* когерентны друг с другом, но при анализе когерентностей с внешними параметрами дают слегка различные результаты. Отличия при анализе вейвлет-спектров и спектров вейвлет-кросс-когерентности для баз данных *NASA-GISS*, *CRU* и *NCDC* на 11- и 22-летних периодичностях состоят лишь в степени статистической значимости наблюдаемых сигналов, сами же сигналы наблюдаются во всех трёх рядах вариаций глобальной температуры.

В данной Главе приведены результаты исследования ряда аномалий глобальной приповерхностной температуры воздуха над сушей с 1880 по 2006 гг., рассчитанных для сети метеорологических станций. Часть представленных ниже в этой Главе результатов приведена для рядов вариаций глобальной температуры баз данных *NASA-GISS*, *CRU* и *NCDC*, а часть — только для ряда *NASA-GISS*.

Несмотря на тот факт, что часть исследования, обсуждаемого далее в данной и последующих Главах, представлена на примере анализа данных из базы данных *NASA-GISS*, автором данной работы также было проведено аналогичное исследование, но основанное на анализе аномалий глобальной температуры из базы данных *CRU* и из базы данных *NCDC*. Это было сделано для сравнения результатов, полученных по данным из разных источников. Было установлено, что полученные закономерности аналогичны для всех трёх рассматриваемых рядов. В Секции, посвящённой обсуждению полученных результатов, затрагивается вопрос о различии в результатах при использовании разных источников данных.

### 2.2.2 Методология

Следует отметить, что в исследованиях, проводимых до начала 1990-х гг., а то и до 2000 года, преимущественно использовались линейные методы анализа экспериментальных данных, особенно корреляционный анализ, Фурье-анализ и метод наложения эпох. Однако, климат является сложной нелинейной пространственно-распределённой динамической системой, ввиду чего применение линейных методов далеко не всегда может привести к получе-

нию результата, всецело отражающего реальность. То, что климат является нелинейной системой, иллюстрирует работа [269], в которой с использованием нейронных сетей построена нелинейная модель поведения климатической системы. Автором [269] показано, что такая модель точнее отражает климатические закономерности, нежели линейные модели [269]. Поэтому в данной работе используются методы, позволяющие исследовать нестационарные системы и описанные в Главе 1, позволяющие отслеживать неустойчивый, эволюционирующий сигнал в рассматриваемом ряде, а именно : вейвлет-анализ (1.1) и метод разложения по эмпирическим гармоникам (Empirical Mode Decomposition, EMD, 1.2), а также комбинации этих методов.

### 2.2.3 Обсуждение результатов

Анализируемые ряды глобальной приповерхностной температуры воздуха, кроме вариаций масштабов десятилетий, вопрос о которых является основной задачей данного исследования, содержат также короткопериодные вариации масштабов нескольких лет, тренды и длиннопериодные вариации. Для того, чтобы выявить нестационарные осцилляции и проанализировать декадные вариации температуры, лучше отфильтровать исходный ряд данных, исключив длиннопериодные вариации, имеющие сравнительно большие амплитуды, а также тренд, отражающий глобальное потепление. Таким образом, амплитуды вариаций, содержащихся в получившемся после вышеописанной предварительной обработки ряде аномалий глобальной температуры, могут быть рассмотрены отдельно от “фона”, которым являются длиннопериодные вариации и тренд, присутствующие в исходном ряде данных.

В связи с этим, возникает вопрос о способе аппроксимации. В данном случае, как было проверено автором настоящей диссертации, аппроксимация полиномом имеет преимущество перед, например, сглаживанием методом скользящего осреднения, состоящее в возможности более качественной аппроксимации исходного ряда.

При выборе степени аппроксимирующего полинома использовался критерий, приведённый в работе [8], основанный на оценке соотношения дисперсий исходного ряда и ряда, аппроксимирующего его:

$$AdjustedR^2 = D_\psi / D_y = 1 - D_0 / D_y, \quad (2.1)$$

где  $AdjustedR^2$  - оценка качества аппроксимации,  $D_\psi$  - дисперсия функции приближения,  $D_0$  - дисперсия остатков,  $D_y$  - дисперсия данных. Чем значение  $AdjustedR^2$  ближе к 1, тем качество аппроксимации выше.



На Рис. 2.2 приведены кривые, иллюстрирующие качество аппроксимации (значения  $AdjustedR^2$ ) исследуемых рядов вариаций глобальной приземной температуры воздуха (3 ряда:  $NASA - GISS_{Land}$ ,  $CRU_{crutem3vgl}$ ,  $NCDC_{Land}$ ) полиномами различных степеней — от 1 до 15. Как видно из приведённых кривых, для всех трёх рядов достаточно хорошая аппроксимация наступает при степени полинома  $\geq 5$  и при увеличении степени меняется не значительно. Однако, как было проверено автором, при расчёте коэффициентов аппроксимирующего полинома в пакете *MATLAB*, для степени полинома “8” и выше возникают проблемы, связанные с обработкой двух типов чисел — очень больших и имеющих большое количество знаков “после запятой”, в результате чего аппроксимирующий полином строится некорректно. Таким образом, учитывая качество аппроксимации в математическом и программном смысле, оптимальным выбором аппроксимации являются полиномы со степенями “5”, “6” и “7”. Аппроксимация полиномом любой из этих степеней позволяет выделить в исходном ряде не только линейный тренд, но и более длиннопериодные (относительно исследуемых декадных) вариации. Следует отметить, что изменения результатов исследования в зависимости от степени аппроксимирующего полинома — “5”, “6” или “7”, — не являются существенными и не сказываются на выводах данной работы. Результаты исследования с использованием аппроксимации полиномом 5-й степени, представленного в данной работе, было проведено автором также и для степеней “6” и “7”.

На Рис. 2.3(A), 2.4(A), 2.5(A) приведены графики вариаций глобальной температуры с 1880 г. по 2006 г. по данным *NASA-GISS*, *CRU* и *NCDC*, соответственно. Наряду с исходными значениями (пунктирная кривая на графике) проведена аппроксимация рядов глобальной температуры полиномом 5-й степени (сплошные кривые на графиках).

Как видно из графиков (Рис. 2.3(A), 2.4(A), 2.5(A)), кривая глобальной температуры представляет собой наложение кратковременных вариаций на температурный тренд, отражающий глобальное потепление, связанное, по видимому, с антропогенным воздействием [112]. Далее анализируются отклонения хода глобальной температуры относительно аппроксимирующей кривой.

На Рис. 2.3(B), 2.4(B), 2.5(A) представлены вейвлет-спектры аномалий глобальной температуры для рядов разных баз данных. Как видно из представленных вейвлет-спектров, все три ряда показывают сходное поведение с некоторыми небольшими отличиями. Можно отметить ряд цикличностей, прослеживающихся в спектрах, которые обсуждаются ниже.

Наблюдаются ярко-выраженные статистически-значимые пики на частоте,

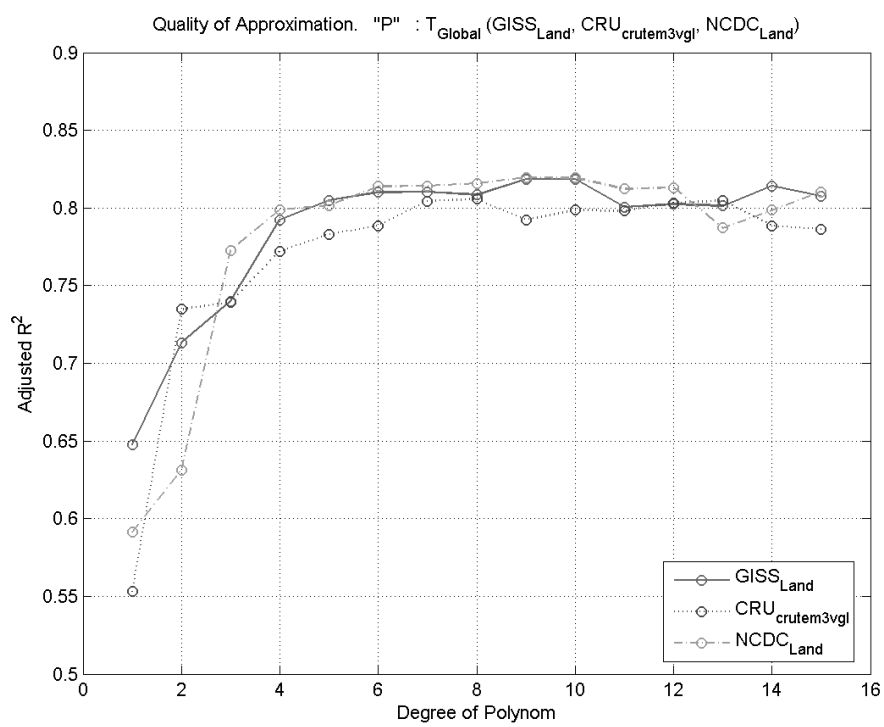


Рис. 2.2: Оценка качества аппроксимации кривых вариаций глобальной температуры  $GISS_{Land}$ ,  $CRU_{crutem3vgl}$  и  $NCDC_{Land}$ .

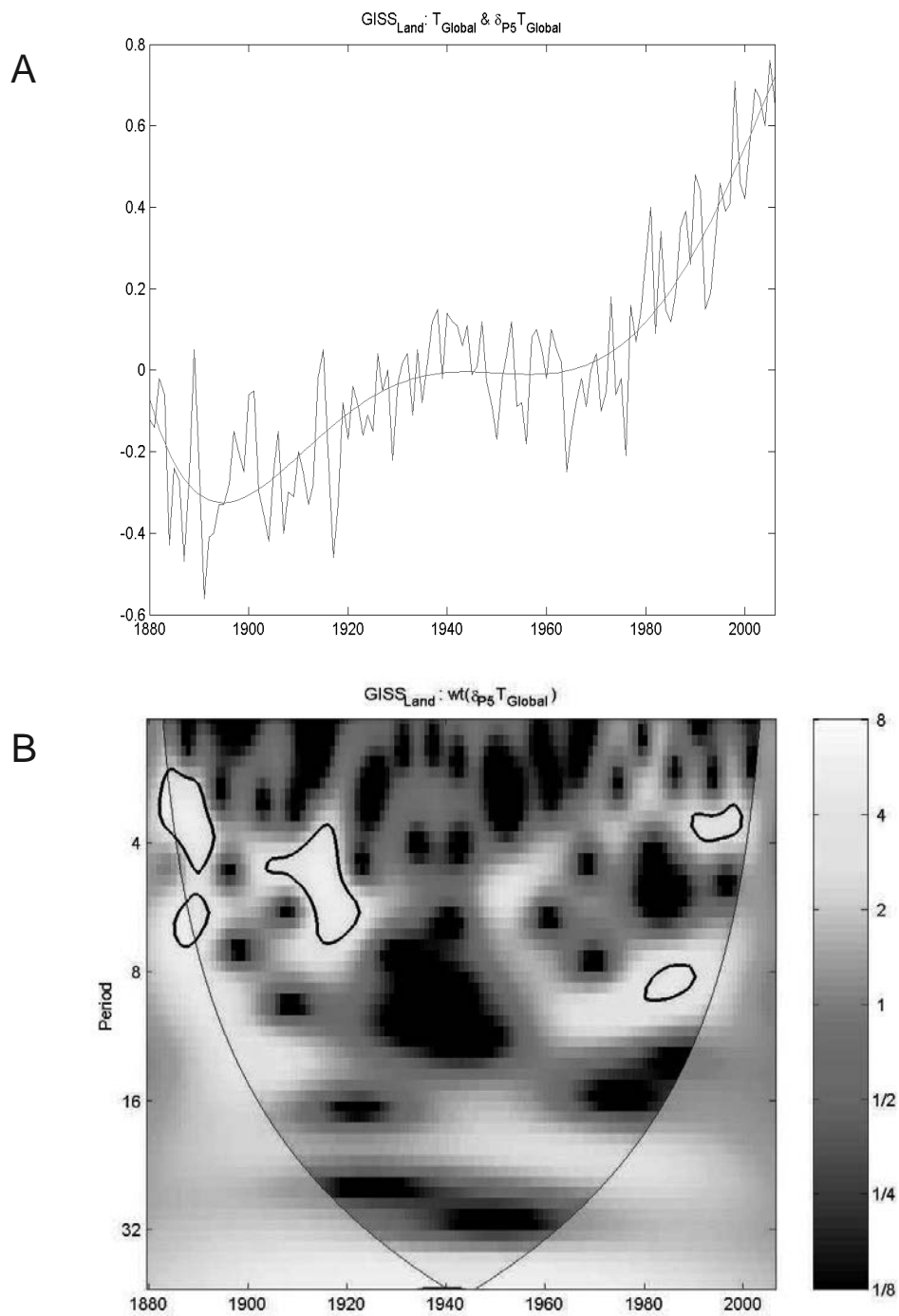


Рис. 2.3: (А) Вариации глобальной температуры (база данных *NASA-GISS*): исходные данные и аппроксимация полиномом 5-й степени. (В) Вейвлет-спектр аномалий глобальной температуры относительно аппроксимирующей кривой.

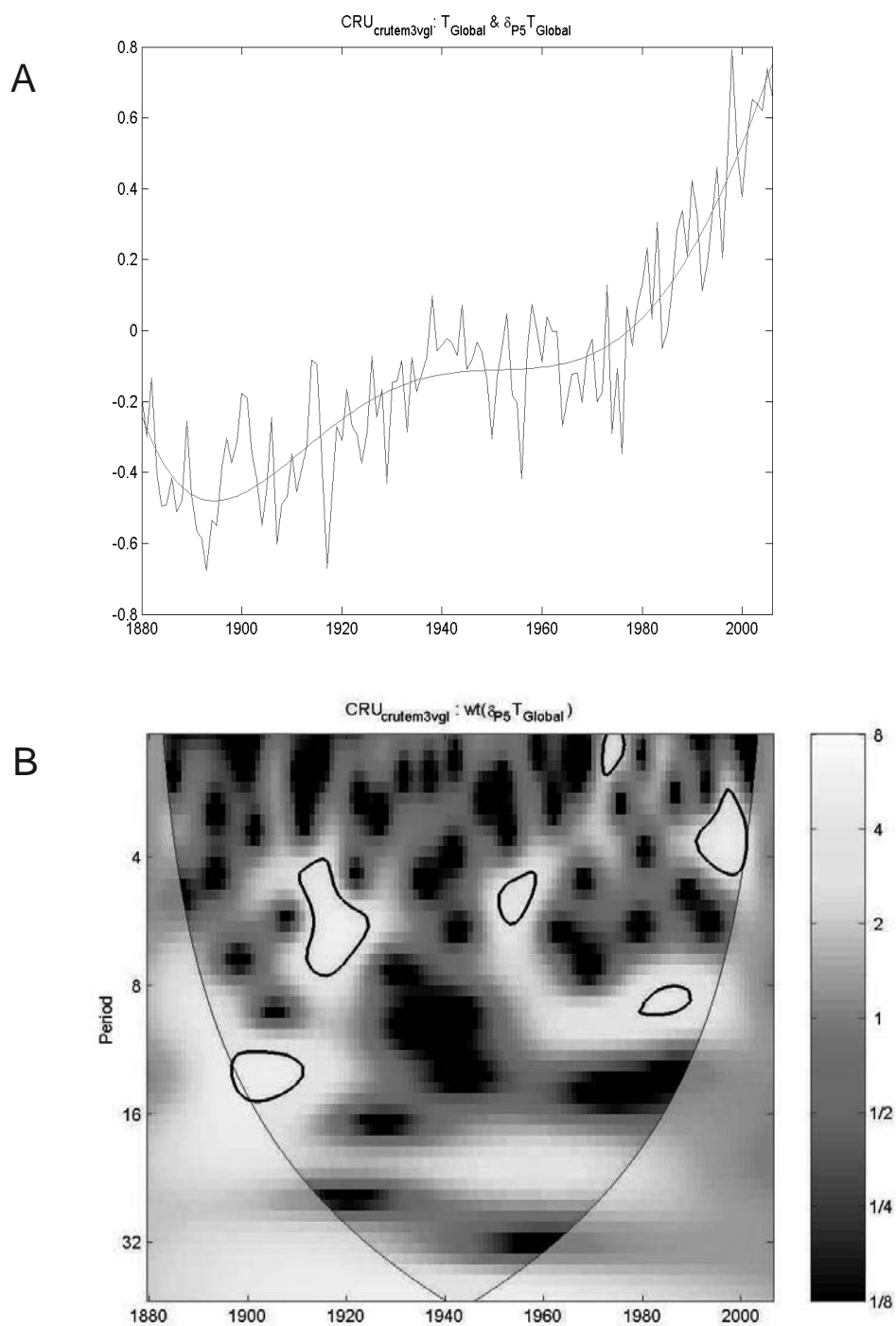


Рис. 2.4: **(A)** Вариации глобальной температуры (база данных *CRU*, ряд “*crutem3vgl*”): исходные данные и аппроксимация полиномом 5-й степени. **(B)** Вейвлет-спектр аномалий глобальной температуры относительно аппроксимирующей кривой.

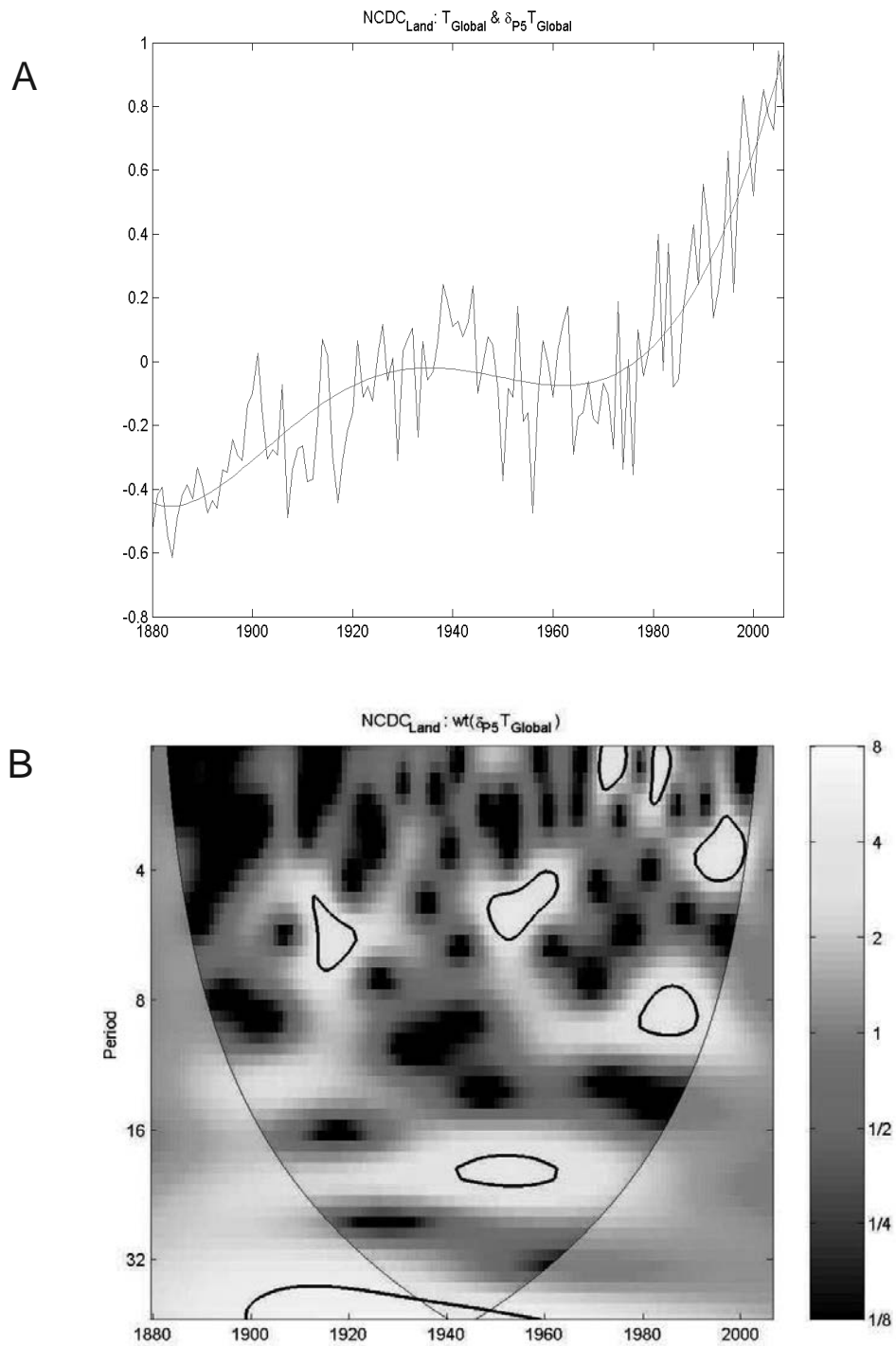


Рис. 2.5: (А) Вариации глобальной температуры (база данных *NCDC*): исходные данные и аппроксимация полиномом 5-й степени. (В) Вейвлет-спектр аномалий глобальной температуры относительно аппроксимирующей кривой.

соответствующей 1-4- и 4-8-летних периодичностей, что может быть связано с явлением Эль-Ниньо, имеющим сходные периодичности.

Особенно интересным в контексте целей данного исследования представляется то, что кроме вышеупомянутых периодичностей в вейвлет-спектре наблюдается небольшой пик на 11-летней периодичности в 1980-1990гг., а 11-летняя периодичность характерна для вариаций солнечной активности (цикл Швабе). Однако, стоит иметь ввиду, что согласно, например, [145] и Разделу 1.1, такие небольшие пики могут возникать и в результате случайных процессов. В общем-то, вопрос заключается не только в том, наблюдается ли сигнал на какой-либо частоте в климатических данных, но и в том, имеет ли таковой сигнал (если он наблюдается) физический смысл, какие физические процессы явились его причиной, или же он является результатом случайного совпадения частот независимых процессов.

Другой пик, соответствующий примерно 8-16-летней периодичности, намечался в окрестностях 1920г. Как видно из приведённых вейвлет-спектров, он является статистически-значимым по данным базы *CRU*, а по данным баз *NASA-GISS* и *NCDC* этот сигнал значимым не является. Что касается вопроса статистической значимости (95% над уровнем “красного” шума) наблюдаемых зон больших амплитуд вейвлет-спектра исследуемого сигнала, то этот вопрос подробно обсуждается в Разделе 1.1 на примерах тестовых функций, распределений и сигналов. Как показано в Разделе 1.1, существенную роль для верной интерпретации получаемых вейвлет-спектров играет принятие во внимание соотношения амплитуд сигналов, входящих в исследуемый ряд, а вследствие этого (Раздел 1.1), и. относительное значение наблюдаемых значений амплитуд вейвлет-спектров. В данном случае (Рис. 2.3(В), 2.4(В), 2.5(В)) в 1980-1990 гг. наблюдается статистически-значимый сигнал на частоте, соответствующей квази-11-летней периодичности, а также в начале XX века — на частотах, соответствующих периодичностям от 2-х до 8 лет. И, как видно из Рис. 2.3(А), 2.4(А), 2.5(А), амплитуды температурного сигнала на соответствующих частотах в соответствующие интервалы времени больше, чем в начале XX столетия на частотах, близких к соответствующим 11-летней периодичности. А большие амплитуды сигнала дают большие амплитуды в вейвлет-спектре, а также — если обе исследуемые амплитуды содержатся в разных частях одного и того же ряда данных, для которого рассчитывается вейвлет-спектр — статистически более значимые. Таким образом, можно сделать вывод, что то, что сигнал в начале XX века не по всем данным является статистически-значимым, не означает, что он может быть только шумом, а не сигналом со сравнительно небольшой амплитудой. В пользу последнего гово-

рит и то, что в вейвлет-спектре одного из рядов этот сигнал наблюдается на статистически-значимом уровне. В данном случае это означает, что в начале XX века наблюдается сигнал на частоте, соответствующей периодичности 8-16 лет, но в зависимости от того, какая сеть метеорологических станций использовалась для расчёта глобальной температуры, а также как именно проводилась предварительная обработка данных, его амплитуда в случае рядов *NASA-GISS* и *NCDC* меньше амплитуд сигналов с периодами 2-8 лет в начале XX столетия и амплитуды сигнала с периодом 11 лет — в конце XX столетия, которые превышают его по статистической значимости, так как являются сигналами с бóльшей амплитудой, с более ярко-выраженными вариациями.

Во всех трёх приведённых вейвлет-спектрах приблизительно в интервале времени с 1920 г. по 1960 г. наблюдается сигнал на частоте, соответствующей квази-22-летней периодичности. Как и в случае 8-16-летней вариации, наблюдаемой в начале XX столетия, этот сигнал также статистически-значимым является только в случае одной из трёх баз данных — *NCDC*, причём только в части интервала, а именно в 1940-1960 гг. По данным же *NASA-GISS* и *CRU* этот сигнал значимым не является, хотя его вейвлет-амплитуда и сравнительно велика.

Если сравнивать вейвлет-спектры рядов аномалий глобальной приземной температуры воздуха для рассматриваемых трёх баз данных, то можно сделать ряд выводов. Как видно из сравнения вейвлет-спектров (Рис.2.3 (В), 2.4 (В) и 2.5 (В)), в ряде “*CRU*” в большей степени присутствуют колебания на высоких частотах, соответствующих периодам менее 8 лет. В ряде “*NCDC*” статистическая значимость всех наблюдаемых периодичностей выше. В этом ряде “островок” квази-11-летней периодичности больше, нежели в двух других рядах, но и колебания на более высоких частотах (периоды менее 8 лет) и на более низких частотах (период 22 года) являются статистически-значимыми. А если сравнивать ряды “*NASA-GISS*”, “*NCDC*” и “*CRU*”, то по относительным значениям квази-11-летний сигнал в спектре ряда “*NASA-GISS*”, а тем более “*NCDC*”, сильнее, нежели сигнал на аналогичной частоте в ряде “*CRU*”. Это может объясняться тем, что при формировании ряда глобальной приземной температуры воздуха по записям базы данных “*CRU*” в число используемых станций не входили станции из приполярных областей обоих полушарий.

Таким образом, в контексте задач данного исследования (исследование причин декадных климатических колебаний) из проведённого анализа данных по *вариациям глобальной приповерхностной температуры воздуха* мож-

но сделать вывод о наличии в исследуемых рядах *статистически-значимых сигналов*: декадной (квази-11-летней) вариации в конце XX столетия и нескольких более высокочастотных (периоды 2-8 лет) колебаний, достаточно кратковременных, возникающих преимущественно в начале и в конце XX века, а также *не всегда статистически-значимых, но обладающих сравнительно большой амплитудой вейвлет-спектра, сигналов*: 8-16-летней вариации в начале XX века и квази-22-летней сравнительно устойчивой вариации на всём рассматриваемом интервале времени с вейвлет-амплитудой, растущей во второй половине XX столетия.

Полученный здесь результат очень важен, так как сам факт присутствия в приповерхностной температуре воздуха колебаний на частоте порядка 11 и 22 лет находится под большим вопросом. Например, авторами работы [27] был исследован ряд данных по глобальной температуре воздуха за 130 лет (работа издана в 1994 г.). Авторы не обнаруживают в колебаниях приземной температуры воздуха ни 11-, ни 22-летних периодичностей. Однако, в колебаниях приповерхностной температуры океана они обнаруживают квази-10-летние колебания в приэкваториальной Атлантике и колебания порядка 3.5 лет — в Тихоокеанском регионе.

Для восстановления более полной картины наблюдающихся в различных рядах данных по вариациям глобальной температуры периодичностей можно провести сравнение полученных для разных рядов результатов. Основные отличия состоят в следующем:

- в вейвлет-спектре аномалий ряда глобальной температуры базы данных *CRU* на периоде 4-6-8 лет “островков” сигнала наблюдается в начале XX века, как и для базы данных *NASA-GISS*, а на периоде 1-2 года не наблюдается, а в конце XX века, в отличие от ряда *NASA-GISS*, наблюдается; кроме того, для рядов *CRU* и *NCDC* наблюдается сигнал с периодом 4-8 лет в середине XX столетия;
- в ряде *CRU* вариация на квази-8-16-летней периодичности в начале XX столетия — наблюдается на статистически-значимом уровне, в отличие от ряда *NCDC*, в котором эта периодичность не является статистически-значимой, как и в ряде *NASA-GISS*;
- квази-22-летняя периодичность в ряде *CRU* наблюдается, но, как и в случае ряда глобальной температуры из базы данных *GISS* — на статистически-незначимом уровне, в отличие от ряда *NCDC*, в котором эта периодичность является статистически-значимой;



Небольшие отличия в результатах наблюдаются при аппроксимации исходных рядов полиномами более высоких степеней. Основное отличие состоит в том, что наблюдаемые в случае всех трёх исследуемых рядов в аномалиях глобальной температуры относительно аппроксимации полиномами 5-й степени периодичности являются немного более ярковыраженными. Например, “островки” занимают чуть бóльшую площадь, по оси времени это обозначает начало/окончание наблюдаемого сигнала на 1-2 года раньше/позже, а диапазон полос наблюдаемых периодичностей становится приблизительно на 1-2 года больше со стороны минимума и максимума. Что касается статистической значимости наблюдаемых периодичностей, то значимость или незначимость наблюдаемых вариаций сохраняется для всех вышеобсуждаемых сигналов.

Для того, чтобы проследить, насколько реальны, “физичны”, вышеописанные периодичности, возникающие в аномалиях глобальной температуры на какие-то, сравнительно небольшие, интервалы времени, к рядам глобальной температуры был применён *EMD*-метод. Ниже обсуждаются результаты исследования глобальной приповерхностной температуры воздуха с помощью последовательного применения метода Разложения по Эмпирическим Модам (Empirical Mode Decomposition, *EMD*) и вейвлет-анализа, проиллюстрированные на примере ряда аномалий глобальной температуры *NASA-GISS*, с целью установить, не являются ли наблюдаемые периодичности случайностями, насколько они устойчивы, являются ли статистически-значимыми и как эволюционируют на протяжении исследуемого интервала времени.

То, что квази-11-летние вариации во второй половине XX-ого столетия, 8-16-летние вариации в начале XX столетия, а также 22-летние вариации в середине XX века не являются случайными не только тогда, когда они статистически значимы, но и тогда, когда они ниже порога значимости 95% над уровнем “красного” шума, можно видеть из Рис. 2.6 и Рис. 2.7.

На Рис. 2.6 приведён результат применения к исходному ряду вариаций глобальной температуры (без вычитания ряда, полученного путём аппроксимации исходного ряда полиномом 5-й степени) метода Разложения по Эмпирическим Модам (Empirical Mode Decomposition, *EMD* (Раздел 1.2)). Как видно из представленных на Рис. 2.6 графиков, в исходном ряде вариаций глобальной температуры содержится несколько мод, в том числе и соответствующих квази-11-летней периодичности. Как видно, моды представляют собой весьма нестационарные сигналы. Для того, чтобы можно было проследить эволюцию мод, представив её более наглядно, каждая из полученных выделенных мод была исследована с помощью вейвлет-анализа. На Рис. 2.7 представлены вейвлет-спектры для мод  $k = 1$ ,  $k = 2$  и  $k = 3$ . Результаты

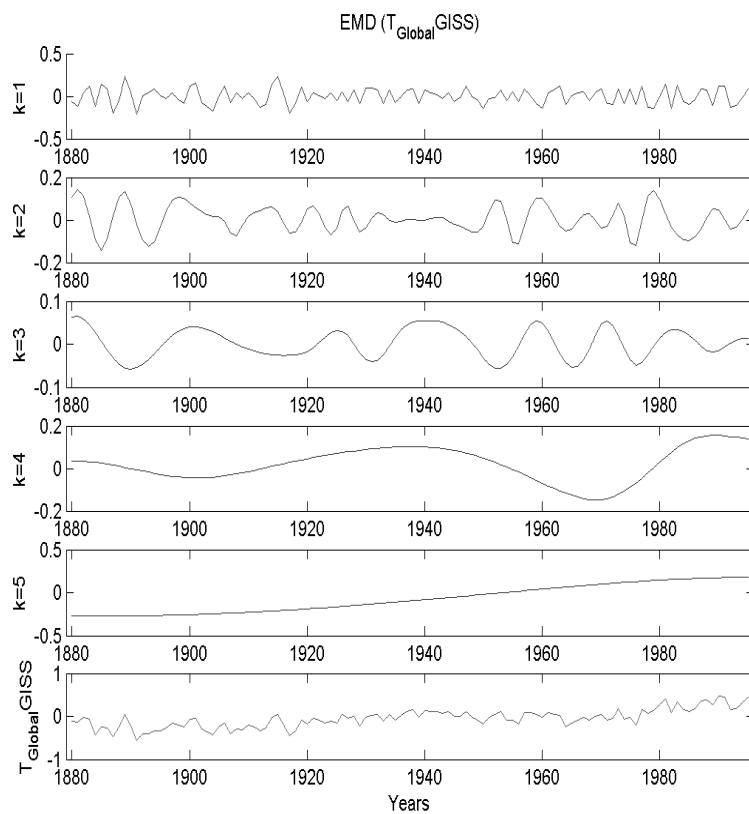


Рис. 2.6: Результат разложения ряда вариаций глобальной температуры (GISS) по эмпирическим гармоникам.

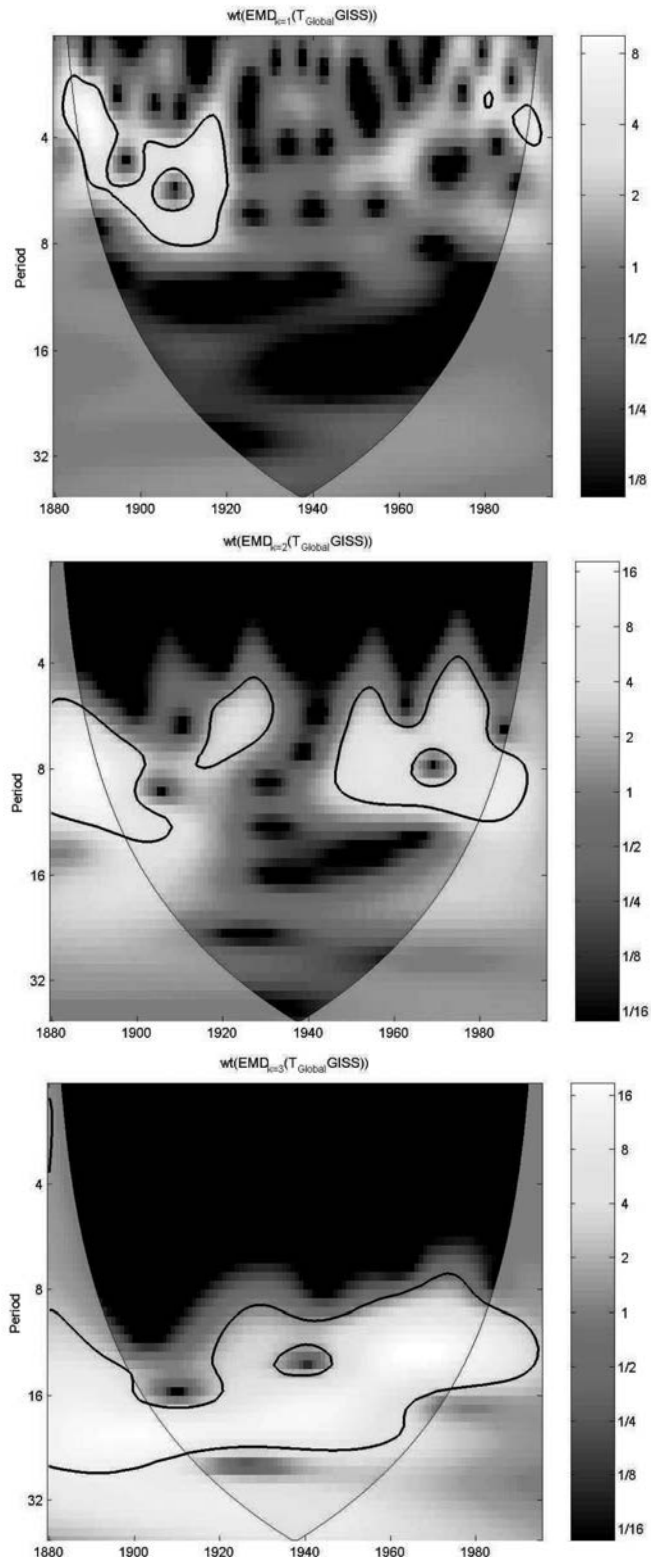


Рис. 2.7: Вейвлет-спектры эмпирических гармоник  $k = 1$ ,  $k = 2$  и  $k = 3$  (порядок “сверху-вниз”) ряда глобальной температуры (*GISS*).

именно для этих трёх мод были выбраны по причине того, что цели данной работы сфокусированы на 11- и 22-летних вариациях в климате, а именно эти моды и отражают колебания глобальной температуры на этих частотах. На верхнем графике (мода  $k = 1$ ) отражены колебания с периодами от 2 до 8 лет. Они наблюдаются в начале XX столетия и в конце. Эти “островки” выделенных периодичностей соответствуют аналогичным сигналам, которые видны в вейвлет-спектре аномалий глобальной температуры, представленном на Рис. 2.3(В). Из сравнения спектров видно, что сигналы в вейвлет-спектре выделенной моды устойчивее и имеют бóльшую амплитуду вейвлет-спектра по сравнению с аналогичными сигналами, наблюдаемыми в вейвлет-спектре ряда аномалий глобальной температуры. В этом состоит одно из достоинств предварительного применения *EMD*-метода для выделения из исследуемого сигнала отдельных мод — это позволяет “очищать” исследуемый сигнал от шумов, выделять тренды и исследовать эволюцию мод, в общем составляющих исходный сигнал. Применяя *EMD*-анализ, можно проследить, насколько исследуемая мода устойчива и насколько постоянно присутствует в исходном сигнале. На среднем графике (мода  $k = 2$ ) хорошо видна эволюция сигнала, имеющего квази-11-летний период. Наблюдаются как сигнал на частотах, соответствующих периоду 8-16 лет в начале XX века, так и сигнал, имеющий квази-11-летнюю периодичность. Как и в случае с верхним графиком, хорошо прослеживается соотношение с Рис. 2.3(В): наблюдаемые сигналы имеются и в вейвлет-спектре аномалий глобальной температуры. Однако, вейвлет-спектр отдельно взятой моды  $k = 2$  отражает эволюцию квази-11-летнего сигнала в “отфильтрованном” виде: в этом случае сигнал более устойчив. А сигнал, наблюдаемый в первой половине XX столетия, в вейвлет-спектре аномалий глобальной температуры наблюдающийся только в виде статистически-незначимого сигнала, при рассмотрении отдельной моды выступает выделенным вполне устойчивым статистически-значимым сигналом.

Можно заметить, что сигнал, наблюдаемый в первой половине XX века, пропадает чуть раньше 1920 г., а сигнал, наблюдаемый во второй половине XX века, появляется чуть позже 1945 г. Кроме этих двух сигналов в вейвлет-спектре моды  $k = 2$  наблюдается также сигнал, находящийся в “полосе” периодов 4-8 лет и находящийся во временном интервале 1915-1935 гг. Нижний график (мода  $k = 3$ ) отражает вариации более длинных периодов и затрагивает полосу периодов от 8 лет до 28-32 лет. Однако “центральная ось” полосы проходит по периодам порядка 16-20 лет. Сигнал очень устойчив и наблюдается практически на всём исследуемом интервале времени. Если сравнить

данный вейвлет-спектр с вейвлет-спектром ряда аномалий глобальной температуры, представленном на Рис. 2.3(В), то можно видеть, что в графике аномалий в соответствующем ранге периодов наблюдается лишь статистически-незначимый, но явно намечающийся сигнал, усиливающийся после 1940 г.

Кроме всего вышперечисленного, графики, представленные на Рис. 2.3(В) и Рис. 2.7 (средний график, мода  $k = 2$ ) выступают иллюстрацией особенности статистической значимости в вейвлет-спектрах исследуемых рядов, обсуждаемой в Разделе 1.1 и в этом Разделе выше: о важности соотношения значений амплитуд колебаний, наблюдающихся в одном и том же ряде в разные временные интервалы, для расчёта статистически-значимых значений амплитуд вейвлет-спектра. Как уже говорилось, сигнал, наблюдаемый в вейвлет-спектре аномалий глобальной температуры (Рис. 2.3(В)) в начале XX века на периодичностях порядка 8-16 лет, не является статистически-значимым. Выше выдвигалось предположение, что это связано с тем, что более интенсивные сигналы доминируют над ним — а именно, в конце XX столетия на квази-11-летней периодичности и в начале XX столетия — на 2-8-летней периодичности. Когда же с помощью вейвлет-анализа исследуются выделенные моды, каждая в отдельности, то из приведённого на Рис. 2.7 (средний график, мода  $k = 2$ ) видно, что обсуждаемый сигнал в начале XX века соседствует с 4-8-летними в начале XX века и квази-11-летним в конце XX века, но в данном случае является статистически-значимым. Из этого можно сделать вывод, что ключевую роль в том, что обсуждаемый сигнал не был статистически-значимым в вейвлет-спектре аномалий глобальной температуры ряда *NASA-GISS* (как и ряда *CRU*), сыграли именно вариации на частотах, соответствующих периодичностям 2-4 года, являвшимися статистически-значимыми, амплитуда которых превышала амплитуду обсуждаемого сигнала. При рассмотрении по модам колебания с периодами 2-8 лет оказались в другой моде ( $k = 1$ ), нежели обсуждаемый сигнал, и не сказались на статистической-значимости его вейвлет-амплитуд. Впрочем, аналогичным примером может служить и Рис. 2.7 (нижний график, мода  $k = 3$ ): в этом вейвлет-спектре прослеживается статистически-значимый квази-22-летний (точнее, находящийся в широкой полосе периодов от 8 до 32 лет, центрированной относительно периодичности 16-20 лет) сигнал, над которым теперь не доминируют моды с периодами 2-8 лет. На графике Рис. 2.3(В) этот сигнал также прослеживается, но не является статистически-значимым, хотя и устойчив. В вейвлет-спектре аномалий глобальной температуры более интенсивные колебания на других частотах (2-8 лет в начале и конце XX века и 11 лет в конце XX века) доминируют над квази-22-летним сигналом. В случае анализа по модам

такого эффекта не возникает, что и видно из Рис. 2.7 (нижний график, мода  $k = 3$ ). Однако, стоит отметить, что для базы данных *NCDC* амплитуда вариаций с периодом 22 года оказалась не столь сильно отличной от амплитуд других присутствующих в ряде сигналов, нежели в двух других базах.

## 2.3 Выводы к Главе 2

Ниже приведено краткое резюме полученных в Главе 2 результатов:

- во второй половине XX столетия в вариациях глобальной приповерхностной температуры воздуха наблюдается декадная (квази-11-летняя) периодичность. “Квази” означает в данном случае то, что периодичность наблюдается не постоянно, а в течение полутора десятков лет, а период, на котором этот сигнал прослеживается, соответствует не строго 11 годам, а находится в диапазоне от 9 до 11 лет;
- для всех трёх исследуемых рядов с 1880 г. до 1920 г. в вариациях глобальной приповерхностной температуры воздуха наблюдаются “островки” сигналов на периодах 2-8 лет, для рядов *CRU* и *NASA-GISS* наблюдаются также периодичности на аналогичных частотах в конце и в середине XX века;
- в начале XX столетия в аномалиях глобальной температуры наблюдается сигнал на периодах 8-16 лет: статистически-значимый в случае ряда *CRU* и не являющийся статистически-значимым для рядов *NASA-GISS* и *NCDC*;
- с 1920 по 1960 гг. в вариациях глобальной приповерхностной температуры воздуха наблюдается статистически-незначимый, но устойчивый — в случае рядов *NASA-GISS* и *CRU*, — и статистически-значимый в интервале 1940-1960 гг. — в случае ряда *NCDC*, — сигнал на частоте, соответствующей 22-летней периодичности.

Итак, из полученных в Главе 2 результатов можно сделать следующие

### ВЫВОДЫ:

- 11- и 22-летняя квазипериодичности в вариациях глобальной приземной температуры воздуха есть;

- сильная нестабильность и небольшая амплитуда 11- и 22-летнего сигналов (что видно из проявления 11-летней периодичности на статистически-значимом уровне только во второй половине XX столетия, и из незначимости 22-летнего сигнала по двум из трёх исследуемых рядов) объясняет противоречия в литературе о существовании в климате такой периодичности;
- близость 11- и 22-летнего периодов к солнечным говорят о возможном влиянии солнечной активности на климат, что требует дальнейшего исследования;
- нестабильность 11-летнего сигнала говорит о том, что кроме периодического солнечного необходимо рассмотреть ещё какой-то фактор, который может нарушить связь между солнечной активностью и климатом. Предлагается исследовать в качестве такого фактора вулканизм, так как он является очень мощным процессом, способным воздействовать на климат.

## Глава 3

# Солнечная, геомагнитная и вулканическая активность

Прежде чем перейти к исследованию когерентностей между внешними (солнечными, геомагнитными, вулканическими) и климатическими факторами и их обоснованиям, к вопросу, насколько наблюдаемые когерентности и фазовые соотношения реальны и физичны, или же случайны, предлагается рассмотреть обсуждаемые внешние факторы и наблюдаемые между ними сами связи — имеющие физический смысл или же являющиеся чисто случайным совпадением, отразившимся в спектре вейвлет-когерентности и фаз.

Итак, в данной Главе рассматривается поведение солнечной, геомагнитной и вулканической активности за несколько сотен лет и обсуждаются наблюдаемые между ними когерентности.

### 3.1 Введение к Главе 3

Этот Раздел посвящён общей информации об исследуемых внешних факторах.

#### 3.1.1 Солнечная активность

Солнце и солнечная активность является предметом исследования уже на протяжении нескольких столетий. Например, работа [22] является примером обзора представлений об уровне знаний о Солнце и солнечной активности конца XIX — начала XX веков. В настоящее время исследования в области физики Солнца развиваются во многих направлениях, как исследования экспериментальных зависимостей, так и моделирования и теории. В качестве некоторых примеров можно привести работы [187, 188] посвящённые солнечной магнитогидродинамике, работы [137, 136, 21], в которых авторы исследу-



ют солнечную активность, моделируют и прогнозируют её с использованием различных методов, в том числе вейвлет-анализа, нейронных сетей и фазовых средних, в исследовании [132] Солнце рассматривается как автономная динамическая система.

В данной работе затрагиваются вариации солнечной активности. Однако, природа солнечной активности и, в частности, цикличности, наблюдаемых в солнечной активности, не является однозначно выявленной. Наиболее распространённой теорией, объясняющей причины солнечной цикличности, является теория о том, что причиной является солнечное динамо [52]. Работа [52] посвящена вопросам солнечного динамо, солнечной активности и моделированию солнечных циклов в рамках динамо-теории.

Как известно, ряд солнечной активности содержит периодичности. Исследования типов и особенностей коротко- и длиннопериодных вариаций, закономерностей циклов проводятся достаточно давно. Некоторые результаты для циклов разных периодов приведены в [175, 161, 252, 84, 260]. Наиболее известные — 11-летний цикл Швабе, 22-летний (магнитный) цикл Хейла, 60-100-летний (вековой) цикл Гляйсберга, 205-210-летний цикл Де Ври (Suess), 600-700-летний и 2000-2400-летний. Понятно, что цикличности с периодами более 400 лет были установлены либо на основе данных низкого качества из наблюдений невооружённым глазом, либо по косвенным данным. Инструментальные записи наблюдений групп солнечных пятен уже достаточно неплохого качества начинаются приблизительно с начала XVII века [101].

### **3.1.2 Геомагнитная активность**

Уровень напряженности магнитного поля Земли содержит как регулярные суточные вариации, связанные с изменениями токов в ионосфере Земли из-за изменения освещённости Земли Солнцем, так и нерегулярные изменения, вызванные воздействием солнечного ветра на магнитосферу Земли, а также связанными с этим изменениями внутри магнитосферы и взаимодействиями ионосфера-магнитосфера.

### **3.1.3 Вулканическая активность**

Как известно, вулканические извержения являются очень мощными событиями, оказывающими заметное воздействие на атмосферу и климат Земли [206], а в некоторых случаях влекущими даже фатальные последствия для целых городов, находящихся на склоне извергающегося вулкана или на близлежащих территориях. Вулканизм, частота извержений, вероятность извержения

такой же силы являются объектом изучения целой области науки. Эти вопросы затрагиваются, например, в работах [29, 220].

## 3.2 Экспериментальные данные

В этом Разделе приводится информация об используемых экспериментальных данных по исследуемым внешним факторам, а также приводится мотивация выбора именно этих типов данных, способы и особенности производимых для их получения измерений, а также описание предварительной обработки в контексте целей данного исследования.

Стоит отметить, что в этой Главе в той её части, которая касается анализа каждого параметра в отдельности, рассматриваются максимально — насколько это возможно — длинные ряды (для того, чтобы иметь как можно более полное представление о их поведении, колебаниях и эволюции). Например, для какого-то параметра характеризующий его индекс может быть доступен за несколько столетий, а для какого-то — всего за одно. В этом случае при индивидуальном рассмотрении каждого из индексов они рассматриваются за весь доступный временной интервал (первый ряд — за несколько столетий, второй — за одно), а при исследовании этих рядов совместно, например в случае исследования их вейвлет-когерентности, рассматривается только общий для них интервал времени (и первый, и второй ряды — за одно, “общее”, столетие).

### 3.2.1 Солнечная активность

В качестве индекса солнечной активности в данном Разделе рассматривался индекс количества групп солнечных пятен (Group SunSpot Numbers, GSN [129]). Этот ряд был выбран потому, что он является самым длинным инструментальным рядом солнечной активности, и может быть использован в том числе и для исследования процессов с 1610 года. Часть этого ряда для более недавнего времени можно сравнить с другими характеристиками солнечной активности, и было установлено, что на масштабах лет и более поведение индекса количества групп солнечных пятен сходно с поведением индекса количества солнечных пятен, который, в свою очередь, отражает вариации общего потока солнечного излучения (Total Solar Irradiance, *TSI*).

### 3.2.2 Геомагнитная активность

Для наблюдения вариаций общего уровня геомагнитной активности и её компонент в локальных и планетарном масштабах используются индексы, представляющие собой ряды данных, отражающие изменения геомагнитного поля на соответствующих масштабах. Индекс  $S_9$  является индексом планетарной геомагнитной активности. Рассчитывается индекс  $S_9$  из значений  $C_p$ , который, в свою очередь, — из значений  $A_p$ , а  $A_p$  — из значений планетарного индекса  $K_p$ .

Как известно, для каждой геомагнитной обсерватории оценка локального, местного индекса  $k$  производится на основании замеров амплитуд трёх компонент магнитного поля ( $H$ ,  $D$  и  $Z$ ) в течение 3-часового интервала времени. Затем рассчитывается изменчивость геомагнитного поля (берётся разность наибольшей из получаемых в каждом интервале времени трёх амплитуд и регулярной части напряжённости поля, рассчитанной по “спокойным” дням). Для вывода локального, местного  $k$ -индекса используются специальные таблицы соответствия между значениями напряжённости магнитного поля и соответствующими им значениями  $k$ -индекса. Таблицы для разных обсерваторий различны ввиду того, что в разных местах на Земле магнитные возмущения проявляются по-разному. Таким образом, для интервала времени в одни сутки набирается 8 значений индекса  $k$ . Планетарный трёхчасовой индекс  $k_p$  рассчитывается как среднее значений индекса  $k$  по данным 12 обсерваторий, находящихся в средних геомагнитных широтах Северного и Южного полушарий. Планетарный суточный  $K_p$ -индекс (индекс Бартельса) получается путём суммирования значений планетарного трёхчасового индекса  $k_p$ . В соответствии с имеющейся таблицей, значения  $k_p$  пересчитываются в значения индекса  $a_p$ . Индекс же  $A_p$  является результатом суммирования 8 значений  $a_p$ -индекса. В соответствии с имеющимися таблицами, индекс  $A_p$  можно пересчитать в индекс  $C_p$ . Значения  $C_p$ , изменяющиеся с точностью до десятых долей, разбиваются на диапазоны, каждому из которых присваивается определённое значение  $S_9$ , изменяющееся в диапазоне от 0 до 9.

Таким образом, индекс  $S_9$  отражает суточные изменения планетарного геомагнитного поля. Надо заметить, что все вышеописанные индексы геомагнитной активности не учитывают структуры составляющих магнитного поля и его частей. Для более детальных количественных исследований вариаций геомагнитного поля используются другие индексы. В задачи данного исследования не входит детальное изучение например, геомагнитных возмущений, требующее данные более высокого разрешения или данные по от-

дельным станциям, а в виду целей исследования необходим некий планетарный индекс, отражающий изменение геомагнитной активности на масштабах лет. Кроме того, вышеописанные индексы являются достаточно недавно введёнными, например индекс  $K_p$  был введён Дж. Бартельсом в 1938 г. А для реализации данного исследования требуется ряд вариаций геомагнитной активности как минимум с последней четверти XIX столетия. Индекс  $C_9$  может быть рассчитан не только приведённым выше современным способом расчёта с использованием значений других индексов, но и напрямую — из замеров геомагнитных станций. Поэтому в данной работе в качестве характеристики планетарной геомагнитной активности используется именно индекс  $C_9$ .

Мониторинг геомагнитных возмущений может осуществляться наземными магнитными обсерваториями, ведущими записи вариаций трёх компонент магнитного поля. Ряд значений индекса  $C_9$  представляет собой достаточно длинный исторический ряд [10]. Данные по значениям индекса  $C_9$  доступны с 1841 г. До 1890 г. индекс рассчитывался по замерам одной станции “Павловск”, но после 1890 г. — по сети станций.

Стоит отметить, что существует ещё один планетарный индекс, удовлетворяющий требованиям данного исследования. Это достаточно длинный, захватывающий часть XIX века, ряд значений геомагнитного  $aa$ -индекса по Майо [19]. Этот индекс, в котором исключены суточные и годовые вариации магнитного поля, был предложен в 1972 г. Р. Н. Майо [153]. При расчёте значений этого и других предложенных Р. Н. Майо индексов используются значения измерений (в 3-часовые интервалы) горизонтальной составляющей геомагнитного поля “антиподальными”, то есть находящимися антиподально друг другу в разных полушариях, обсерваториями (в Южной Англии — Гринвич, и в Австралии — Мельбурн). Данные по значениям этого индекса доступны с 1868 г.

В данном исследовании в качестве характеристики геомагнитной активности был использован ряд  $C_9$ , как отражающий планетарные изменения геомагнитного поля, а также как покрывающий наибольший интервал времени.

Возмущения геомагнитной активности хорошо коррелируют с возмущениями в солнечном ветре и межпланетном магнитном поле, контролируемые, в свою очередь, крупномасштабными магнитными полями на Солнце. Простой глобальный  $C_9$ -индекс рассчитывается по данным, полученным в результате измерений среднеширотных геомагнитных станций, находящихся между  $44^\circ$  и  $60^\circ$  геомагнитной широты. Значения индекса  $C_9$  могут варьироваться в диапазоне от 0 до 9.

### 3.2.3 Вулканическая активность

Существует ряд индексов, с помощью которых чаще всего описывается интенсивность вулканических извержений.

В данной работе для характеристики силы извержений используются два индекса: Volcanic Explosive Index (*VEI*) – для характеристики извержения как отдельного вулканического события с целью оценки его мощности, и Dust Veil Index (*DVI*) – для характеристики степени воздействия извержения на атмосферу и климат Земли.

- *Volcanic Explosivity Index (VEI)*. Индекс *VEI* был введён в 1982 г. Кр. Ньюхоллом и С. Селфом, и описан ими в работе [167].

Используется *VEI* для “геологической” характеристики, для относительной оценки мощности вулканического извержения. Для определения значения *VEI* для каждого вулканического извержения учитываются как некоторые количественные (объём выброшенных вулканических продуктов извержения, высота вулканического облака), так и качественные, визуально определяемые, характеристики (визуальная оценка мощности извержения).

*VEI* вычисляется для каждого извержения в отдельности. Кроме того, может быть рассчитан и ряд среднегодовых значений *VEI* — глобальных и по полушариям.

Значения, которые может принимать *VEI*, варьируются в интервале от 0 до 8. Верхняя граница определена “экспериментальным” путём: теоретически, она является открытой, иначе говоря — возможно извержение и с бóльшими значениями *VEI*, но до сих пор, ни в современную, ни в доступную для исследования и “оценок” эпохи, такого не происходило. *VEI* характеризует силу вулканического извержения в логарифмическом масштабе. Другими словами, то, что значение *VEI* всего лишь на 1 больше, означает, что мощность извержения с таким значением *VEI* в 10 раз превышает мощность извержения со значением *VEI* на 1 меньше.

В Таблице 3.1 приведена используемая для вычисления значений *VEI* классификация вулканических извержений в соответствии с количественными и качественными характеристиками. (В колонке “Количество в истории” приведены оценки количества извержений за 10000 лет по 1994 рисункам, построенным в рамках Глобальной Вулканической Программы (Global Volcanism Program). Таблица взята из статьи “Volcanic

Explosivity Index” (“Wikipedia. The Free Encyclopedia”), материалы которой основаны на работах [167] и [151].

Следует отметить, что для расчёта фактического количества выброшенной магмы учитываются как пыль и вулканические бомбы, так и эффект пузырения газа. Однако, в *VEI*, как показателе мощности извержения, присутствует недостаток, связанный с тем, что не оценивается изначальная мощность выброса магмы из жерла вулкана во время извержения. Для исторических извержений это очень сложно, практически невозможно оценить.

- *Dust Veil Index (DVI)*.

Индекс *DVI* был предложен и введён в использование в 1970 г. Г. Г. Ламбом и описан им в работе [122]. Основное назначение индекса *DVI* — оценка климатических последствий вулканических извержений. При его расчете принимаются во внимание такие характеристики, как ослабление прямой радиации вследствие извержения, понижение температуры, а также количество вулканической пыли (в кубических метрах), рассеянное в атмосфере. Ламбом были использованы пять различных методов расчёта индекса *DVI* (более детально описанных ниже), основанных на оценках различных типов климатических изменений вследствие извержения, для отдельно взятых событий с целью оценки воздействия вулканических извержений на климат. Результирующее значение индекса *DVI* является осреднением значений, полученных разными методами с допущением субъективных поправок в случае необходимости. То, сколькими методами рассчитывается индекс, определяется для каждого извержения индивидуально: наличием данных, возможностью определения необходимых параметров и так далее. Наиболее точное значение индекса *DVI* для исследуемого вулканического извержения получается при учёте оценок, полученных с помощью применением всех пяти методов. Остановимся на них поподробнее. Первый метод состоит в предварительной обработке вторичной, исторической, информации. Далее из ещё трёх методов на основании результатов, полученных с помощью первого, выводится значение индекса *DVI* для рассматриваемого вулканического извержения. Эти три метода позволяют рассчитать *DVI* с помощью трёх формул (3.1, 3.2, 3.3) после того, как была произведена первая, предварительная, оценка по историческим архивам. Эти формулы основаны, соответственно:

Таблица 3.1: Классификация, параметры и характеристики вулканических извержений в соответствии со значениями *VEI*.

<i>VEI</i>	Классификация (Classification)	Описание (Description)	Высота выброса (Plume)	Объём выброшенных веществ (Ejecta Volume)	Частота (Frequency)	Пример (Example)	Количество в истории (Occurrences)
0	Hawaiian	non-explosive	< 100 m	< 10,000 $m^3$	daily	Mauna Loa	many
1	Hawaiian / Strombolian	gentle	100-1000 m	> 10,000 $m^3$	daily	Stromboli	many
2	Strombolian / Vulcanian	explosive	1-5 km	> 1,000,000 $m^3$	weekly	Galeras (1993)	3477
3	Vulcanian / Pelean	severe	3-15 km	> 10,000,000 $m^3$	yearly	Koryaksky	868
4	Pelean / Plinian	cataclysmic	10-25 km	> 0.1 $km^3$	$\geq 10$ yrs	Soufrière Hills (1995)	278
5	Plinian	paroxysmal	> 25 km	> 1 $km^3$	$\geq 50$ yrs	St. Helens (1980)	84
6	Plinian / Ultra-Plinian	colossal	> 25 km	> 10 $km^3$	$\geq 100$ yrs	Mount Pinatubo (1991)	39
7	Plinian / Ultra-Plinian	super-colossal	> 25 km	> 100 $km^3$	$\geq 1000$ yrs	Tambora (1815)	5 (+2 suspected)
8	Ultra-Plinian	mega-colossal	> 25 km	> 1,000 $km^3$	$\geq 10,000$ yrs	Toba (73,000 BP)	0

- на оценках ослабления потока радиации вследствие вулканического извержения:

$$DVI = 0.97 R_{max} E_{max} t_{m0}, \quad (3.1)$$

где  $R_{max}$  — наибольшее (в процентном отношении) ослабление потока прямой радиации, оцениваемое по среднемесячным значениям в средних широтах того полушария, в котором произошло извержение,  $E_{max}$  — степень географической протяжённости завесы, состоящей из частиц вулканического происхождения и  $t_{m0}$  — количество времени (в месяцах), в течение которого эта завеса держится в атмосфере. Значение  $E_{max}$  зависит от географической широты местности, в которой произошло вулканическое извержение. В Таблице 3.2 приведены значения  $E_{max}$  в соответствии с поясами низких, средних и высоких широт обоих полушарий.

- на оценках вариаций температуры воздуха, вызванных извержением:

$$DVI = 52.5 T_{dmax} E_{max} t_{m0}, \quad (3.2)$$

где  $T_{dmax}$  — понижение температуры в градусах Цельсия в средних широтах полушария, в котором произошло извержение, в тот год после извержения, в который его последствия проявились наиболее сильно;  $E_{max}$  и  $t_{m0}$  — как в формуле 3.1.

- на оценках количества твёрдых частиц, выброшенных в атмосферу в процессе извержения:

$$DVI = 4.4 q E_{max} t_{m0}, \quad (3.3)$$

где  $q$  — оценка количества твёрдых вулканических частиц (в кубических километрах), выброшенных в атмосферу в процессе извержения;  $E_{max}$  и  $t_{m0}$  — как в формуле 3.1.

Для получения окончательного индекса, была произведена нормировка на извержение вулкана Кракатау (1883), для которого был положен  $DVI = 1000$ . Для примера,  $DVI$  в годы извержения вулканов Лаки (1783) составил 124, Тамбора (1815) — 699, Косигуина (1835) — 805. При отсутствии вулканической активности  $DVI$  равен нулю, слабые извержения дают  $DVI$  порядка десятков единиц, а извержения средней силы —  $DVI$  порядка 100-200.



Таблица 3.2: Степень, характеризующая протяжённость “завесы” в атмосфере, возникшей вследствие вулканического извержения, в зависимости от географической широты.

$E_{max}$	Широта
1.0	20°N-20°S
0.7	20° — 35°
0.5	35° — 40°-42°
0.3	высокие широты

Среднегодовые значения индекса  $DVI$ , рассчитанного по методу, предложенному Ламбом на основании анализа вулканической деятельности для всего Земного шара и отдельно по полушариям, находятся в базе данных NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA (IGBP Pages/World Data Center for Paleoclimatology, Data Contribution Series No.2000-075 [142]). В исследовании, описываемом в данной работе, использовались глобальные значения индекса  $DVI$  ( $DVI_{Global}$ ) именно этой базы данных.

Однако, следует отметить, что в настоящее время существует два варианта расчёта индекса  $DVI$ : с учётом изменений температуры воздуха вследствие вулканического извержения и без учёта такового. Для исследования, представляемого в данной работе, автором использовался ряд  $DVI_{Global}$ , включающий изменения температуры. Такой выбор объясняется тем, что ряд, отражающий изменения температуры в результате извержения, наиболее подходит для поиска причин температурных вариаций, исследования возможности их обусловленности вулканическими процессами благодаря возможности сопоставления напрямую температурных вариаций, вызванных извержением, с температурными вариациями, присутствующими как в глобальных температурных рядах, так и в рядах станций, распределённых по всей планете. Тем не менее, стоит отметить, что исследование было проведено также и для ряда без учёта изменений температуры. Несмотря на различия в результатах, основные тенденции, присутствующие на графиках и в спектрах вейвлет-когерентности с вариациями приземной температуры воздуха, сохраняются.

### 3.3 Методология

В данной Главе к исследуемым рядам данных применяется вейвлет-анализ и анализ вейвлет-кросс-когерентности и фаз, описанные в части (1.1) Главы 1, позволяющие отслеживать неустойчивый, эволюционирующий сигнал в одном из рассматриваемых рядов, а также наличие и эволюцию когерентностей и фазовых соотношений между двумя исследуемыми рядами. Важным аспектом исследования фазовых соотношений между двумя рассматриваемыми рядами является то, что даже при наличии ярко-выраженной статистически-значимой когерентности между рядами, исследование фазовых соотношений может дать ответ на вопрос, имеет ли наблюдаемая когерентность физический смысл, или же является чисто математическим следствием того, что в обоих исследуемых рядах случайным образом на рассматриваемом интервале времени наблюдается сигнал на какой-либо частоте. Такой вывод может быть сделан только на основе анализа имеющей место когерентности в совокупности с предполагаемой физикой процесса, гипотетически ответственного за наблюдаемую когерентность.

### 3.4 Обсуждение результатов

Этот Раздел посвящён обсуждению наблюдающихся в солнечной, геомагнитной и вулканической активности цикличностей — устойчивых и спонтанно возникающих ввиду каких-либо причин. Кроме того, особое внимание уделено обсуждению когерентностей и фазовых соотношений между рядами данных, характеризующими исследуемые процессы, что очень важно в контексте данной диссертации.

#### 3.4.1 Солнечная активность

В этой Главе рассматриваются вариации от декадных (циклы Швабе и Хейла) до вековых (Гляйсберга).

На Рис. 3.1 приведён график вариаций солнечной активности (количество групп солнечных пятен) с 1610 по 1995 г.

Хорошо видна 11-летняя цикличность — цикл Швабе.

Амплитуды 11-летних циклов варьируются: как в паре чётный-нечётный циклы, так и с течением времени.

Вейвлет-спектр солнечной активности (Рис. 3.1, нижняя панель) также отражает 11-летнюю периодичность, в частности, хорошо видно увеличение

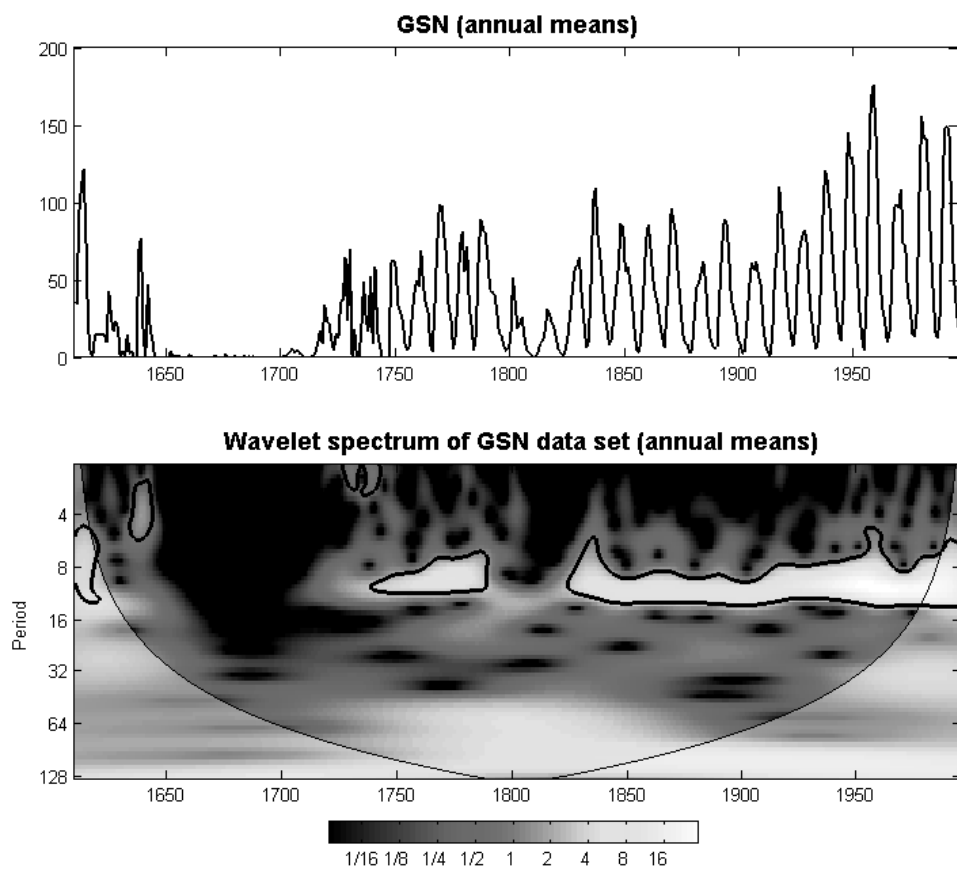


Рис. 3.1: Кривая (верхняя панель) и вейвлет-спектр (нижняя панель) вариаций индекса *GSN* солнечной активности с 1500 по 2000. В вейвлет-спектре выделенные зоны превышают порог значимости 95% над уровнем “красного” шума.

амплитуды 11-летних вариаций солнечной активности (см. Раздел 1.1) во второй половине XX-ого столетия. Этот вывод, в данном случае, хорошо виден и непосредственно на графике вариаций солнечной активности (Рис. 3.1, верхняя панель).

На этой частоте сигнал достаточно стабилен. Однако, наиболее яркие рассматриваемый интервал времени минимумы — минимум Дальтона (приблизительно в 1790-1820 гг.) и минимум Маундера (приблизительно в 1645-1715 гг.) — солнечной активности также хорошо видны в графике вариаций и в вейвлет-спектре вариаций солнечной активности.

22-летняя периодичность — магнитный цикл Хейла — физически соответствует знакопеременному 11-летнему ряду (знакопеременность обусловлена сменой полярности групп пятен на противоположную каждые 11 лет, вследствие чего можно сказать, что 22-летний, магнитный, солнечный цикл является более физичным, нежели 11-летний).

Кроме вышечисленных, на Рис. 3.1 (верхняя панель) виден так называемый “вековой цикл Гляйсберга”, продолжительность которого составляет около 60-120 лет. И его можно рассматривать, как некие длинно-периодные вариации, своего рода тренд, накладывающийся на 11-летний цикл Швабе [252]. В вейвлет спектре на Рис. 3.1 (нижняя панель) цикл Гляйсберга присутствует в виде статистически незначимой периодичности. Недостаточно высокая статистическая значимость сигнала может объясняться тем, что ряд является недостаточно длинным, а также тем, что присутствует очень яркий сигнал на 11-летней периодичности, который доминирует по значимости над вековым циклом.

Природа 11-летнего, 22-летнего и векового циклов солнечной активности может объясняться теорией солнечного динамо [252].

### 3.4.2 Геомагнитная активность

Главная периодичность, наблюдающаяся в данных по  $C_9$  — 11-летняя (Рис. 4.3 (верхняя панель), Рис. 3.2). Ниже обсуждается обусловленность этой вариации вариацией солнечной активностью на аналогичной частоте.

### 3.4.3 Когерентность солнечной и геомагнитной активности

Ряд вариаций индекса  $C_9$  хорошо коррелирует с вариациями солнечной активности на частотах, соответствующих 11- и 22-летней периодичности (Рис. 3.3).

Рис. 3.1 и Рис. 3.2 иллюстрируют тот факт, что 11-летняя цикличность в геомагнитной активности — солнечного происхождения (известный 11-летний

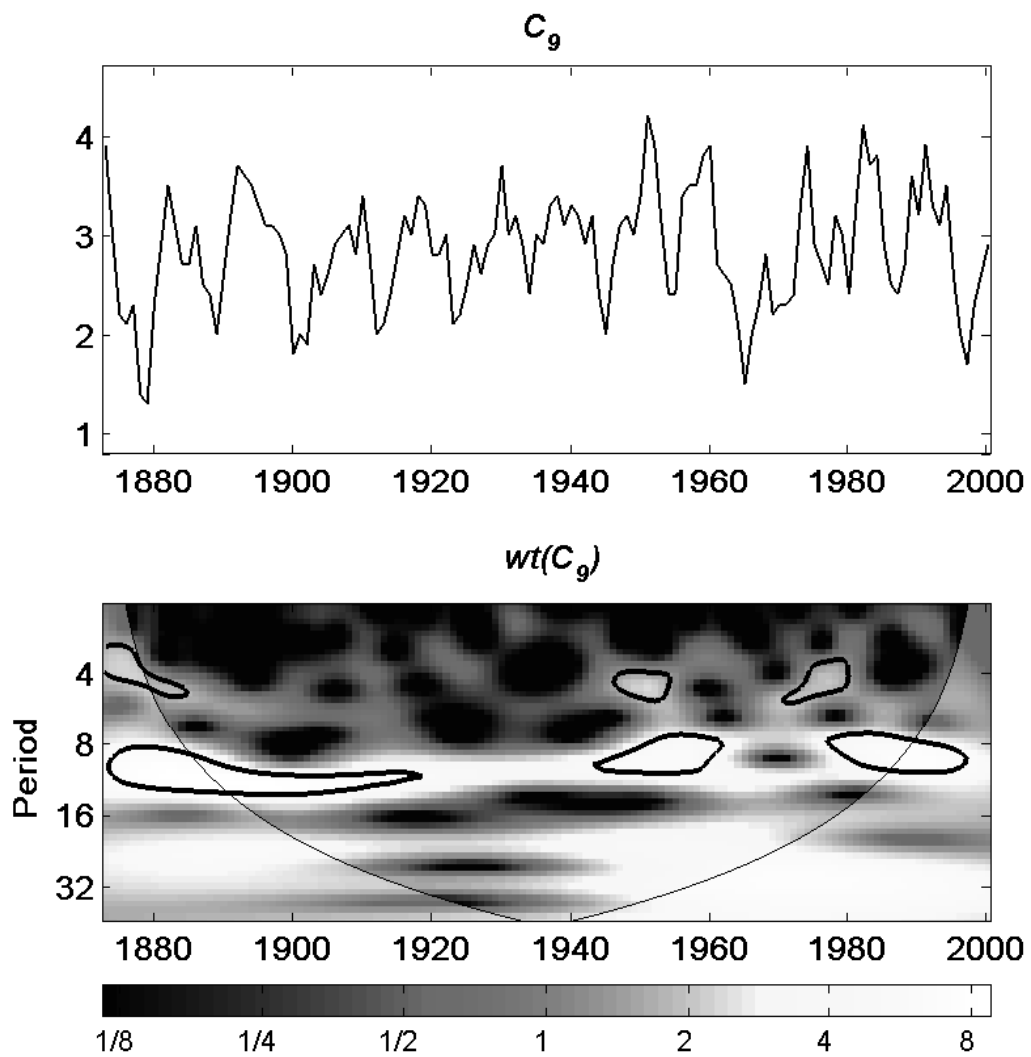


Рис. 3.2: График вариаций и вейвлет-спектр геомагнитной активности (индекс  $C_9$ ). Выделенные зоны превышают порог значимости 95% над уровнем “красного” шума.

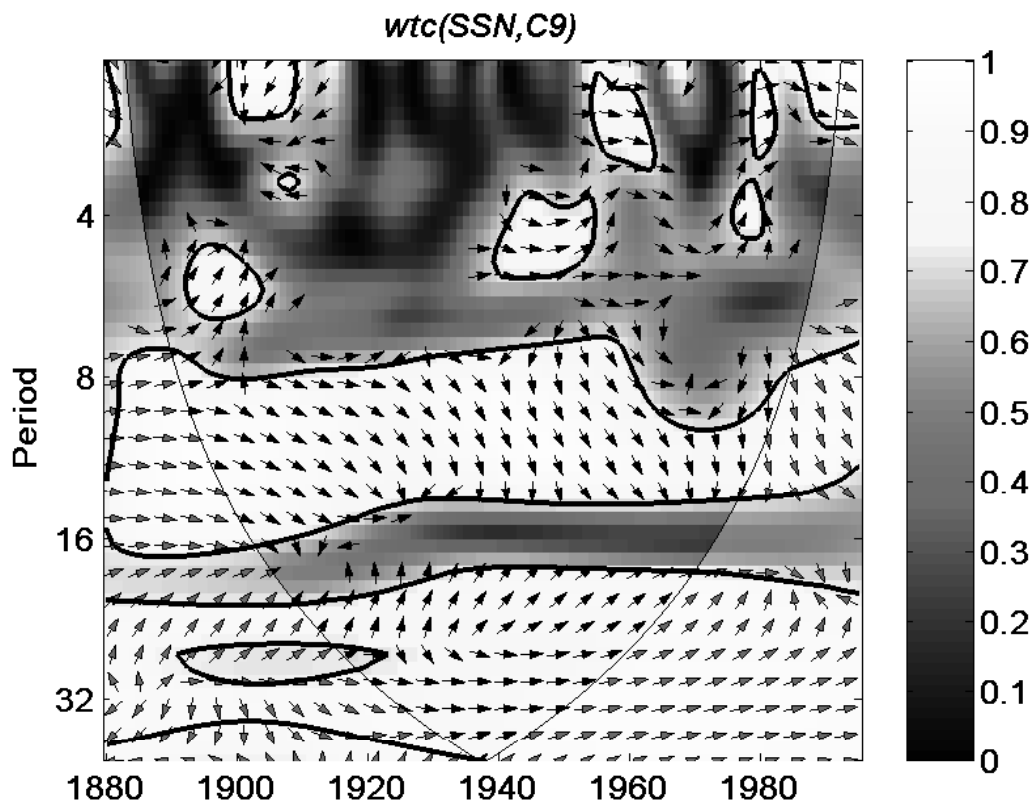


Рис. 3.3: Спектр вейвлет-когерентности солнечной и геомагнитной активности. Выделенные зоны превышают порог значимости 95% над уровнем “красного” шума. Направление стрелок слева-направо означает, что ряды находятся в фазе, справа-налево — то, что ряды находятся в противофазе, а вертикально вниз — то, что первый ряд (солнечная активность) опережает второй (геомагнитная активность) на четверть периода, вверх - означает соответствующее запаздывание.

цикл солнечной активности Швабе), что полностью согласуется с физикой процесса ([127, 226]). В поведении обеих кривых чётко видна 11-летняя периодичность. Причём, вариации геомагнитной активности “запаздывают” относительно вариаций солнечной на небольшой промежуток времени (0–2.75 лет).

Спектр вейвлет-когерентности солнечного и геомагнитного рядов данных приведён на Рис. 3.3. Хорошо видна когерентность рядов на декадной шкале.

#### 3.4.4 Вулканическая активность

На Рис. 3.4 (верхняя панель) приведён график вариаций вулканической активности с 1500 по 2000 год на примере кривой глобальных значений  $DVI$ . Из этого графика можно видеть, что в первой половине XIX века на фоне менее сильных возмущений наблюдались 2 резких всплеска в кривой  $DVI_{Global}$ . На нижнем панели этого же Рисунка приведён вейвлет-спектр кривой  $DVI$  за тот же временной интервал. В спектре можно видеть сигнал, спровоцированный последовательностью особо и чуть менее сильных извержений в первой половине XIX века. Сигнал наблюдается на частоте, соответствующей квази-12-16-летней периодичности. Кроме того, сигнал наблюдается в это же время и на других, более коротких, периодах. Это может быть вызвано менее интенсивными извержениями. В конце XX столетия можно видеть квази-11-летний сигнал в вейвлет-спектре индекса  $DVI_{Global}$ , что представляется особенно интересным в контексте целей описываемого в данной диссертации исследования. Этот сигнал частично находится вне конуса доверия, но начинается явно внутри него, поэтому в данном случае можно делать выводы о реальности этого сигнала (Раздел 1.1).

#### 3.4.5 Когерентность солнечной и вулканической активности

На Рис. 3.5 приведён спектр амплитуд и фаз вейвлет-когерентности вулканической и солнечной активности с 1600 по 2000 гг. (направление стрелок направо обозначает, что ряды находятся в фазе, налево - в противофазе, вниз - вулканический ряд опережает солнечный). Особенно интересным представляется наличие ярко-выраженной когерентности между рассматриваемыми рядами (с запаздыванием солнечной активности относительно вулканической на четверть периода) до 1900 г. на частотах, соответствующих периодам 32-64 г. В результате исследования можно заключить, что между солнечной и вулканической активностью до 1900 г. существовала фазовая когерентность на мультидекадных масштабах времени.

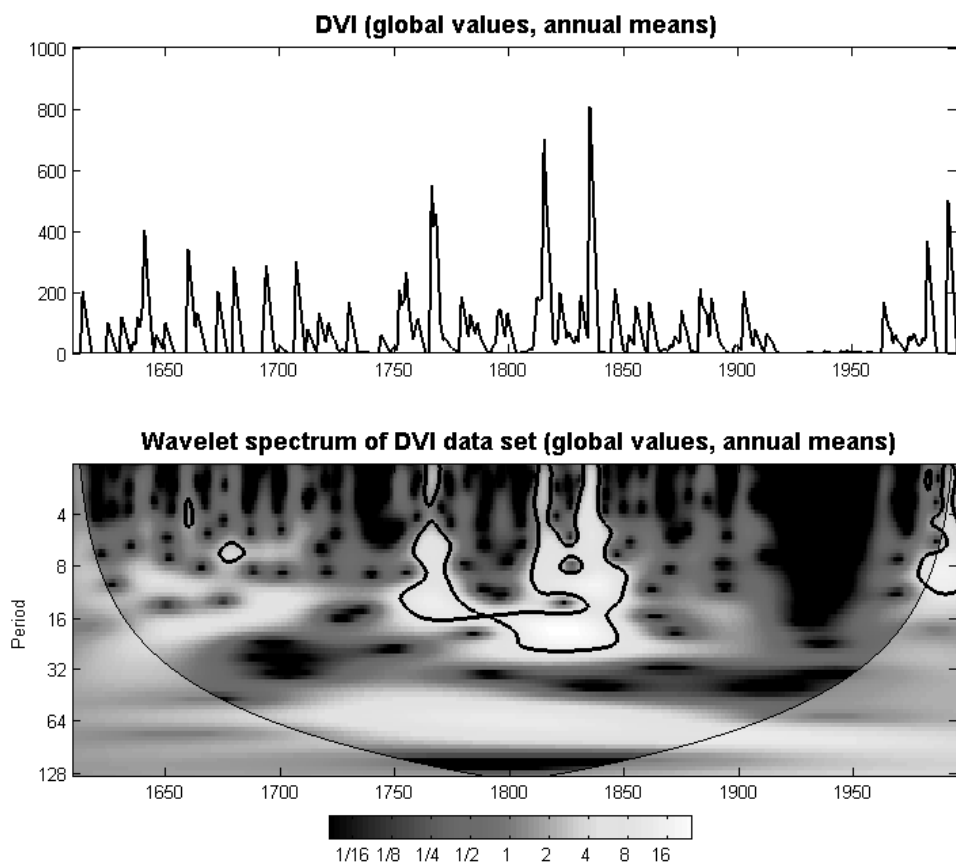


Рис. 3.4: Кривая (верхняя панель) и вейвлет-спектр (нижняя панель) вариаций глобальных значений индекса *DVI* с 1500 по 1995. В вейвлет-спектре выделенные зоны превышают порог значимости 95% над уровнем “красного” шума.



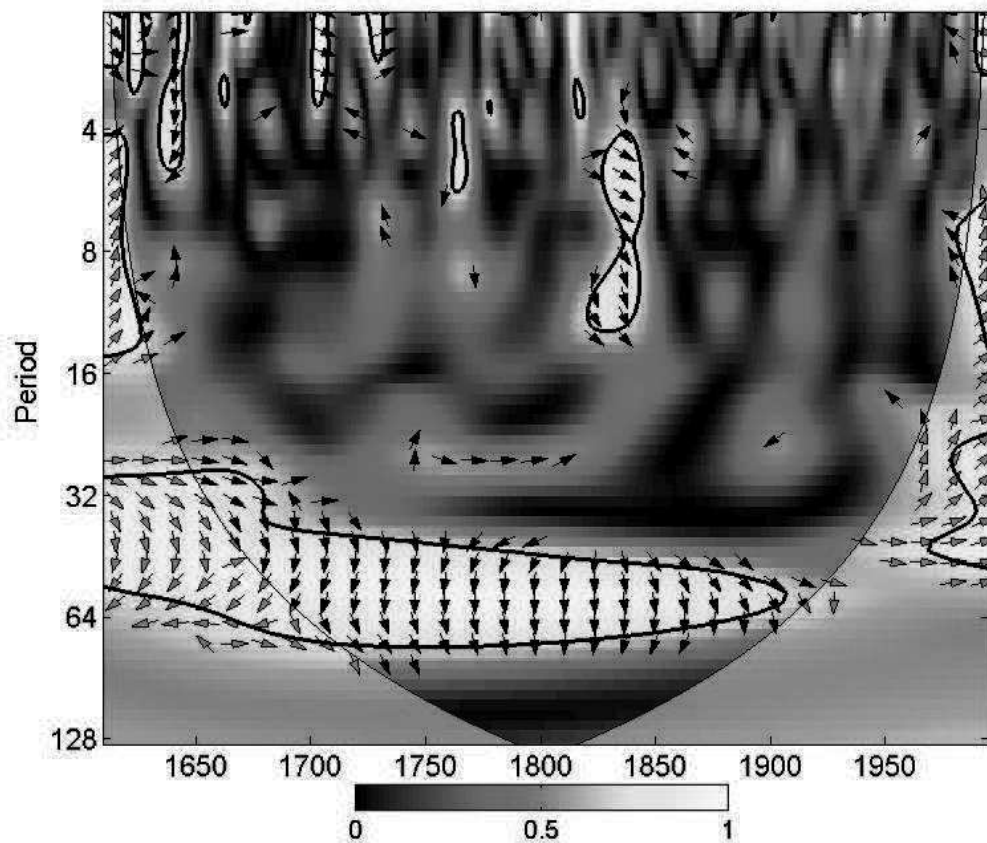


Рис. 3.5: Спектр вейвлет-когерентности вулканической ( $DVI_{Global}$ ) и солнечной ( $GSN$ ) активности с 1600 по 2000. Выделенные зоны превышают порог значимости 95% над уровнем “красного” шума. Направление стрелок слева-направо означает, что ряды находятся в фазе, справа-налево - в противофазе, а вертикально вниз - то, что первый ряд (вулканическая активность) опережает второй (солнечная активность) на четверть периода, вверх - означает соответствующее запаздывание.

В работе [235] затрагивается вопрос корреляций между солнечной и вулканической активностями на длиннопериодных масштабах. Были исследованы ряды солнечной и вулканической активности за последние 500 лет. По наблюдению автора [235], вулканическая активность, как правило, выше в годы глубоких солнечных минимумов и наоборот. Автор [235] делает вывод о существовании двух возможностей:

- некоторого воздействия вариаций солнечной активности на вулканизм через вариации геомагнитной активности,
- случайного совпадения цикличностей.

В первом случае, автор [235] допускает как воздействие солнечной активности на климат через вулканическую, так и напрямую. Во втором — допускается лишь воздействие вулканической активности на климат, корреляции же климата с солнечной активностью объясняются совпадением солнечных цикличностей с вулканическими.

В другой работе — [69] — также рассматриваются соотношения между вариациями солнечной и вулканической активности. Авторы делают вывод о наличии между двумя процессами положительной корреляции, однако фаза иногда нарушается извержениями.

Авторами вышеобсуждаемых работ [235, 69] использовались линейные методы. С помощью вейвлет-когерентного анализа, применённого в данной работе удалось установить, что когерентность наблюдается до 1900 г.

Конечно же, встаёт вопрос о природе наблюдаемой когерентности.

Из Рис. 3.5 можно предположить три объяснения наблюдаемой когерентности. Рассмотрим далее все три гипотезы в отдельности и более подробно.

- Солнечная активность каким-то образом сказывается на вулканической. По мнению автора [235] такой эффект вполне возможен через посредство вариаций геомагнитной активности. Однако, вулканизм сам по себе является очень мощным процессом. И хотя причины наблюдаемых в вулканической активности периодичностей являются предметом исследования и не имеют одного общепризнанного объяснения, вероятнее всего, цикличности, наблюдаемые в вулканической деятельности, определяются движениями в мантии Земли. И очень маловероятно, что на такое мощное явление, как вулканизм, может повлиять такой очень внешний и слабый по сравнению с ним фактор, как вариации солнечной активности. Кроме того, если учесть фазовое соотношение между солнечной и

вулканической активностью (Рис. 3.5), а именно: вулканическая активность опережает солнечную на четверть периода, то получается, что эта гипотеза маловероятна.

- То, что когерентность между солнечной и вулканической активностью наблюдается именно до начала XX столетия, может говорить о том, что обсуждаемая когерентность может быть связана с качеством наблюдений солнечной активности в прошлом.

Противоречит этой гипотезе, однако, опять же, наблюдаемое (Рис. 3.5) фазовое соотношение между солнечной и вулканической активностью. Из спектра вейвлет-когерентности видно, что вулканическая активность опережает солнечную на четверть периода, то есть рост вулканической активности “влечёт” за собой рост солнечной. С точки зрения гипотезы качества наблюдений это является странным, так как более логичным был бы противоположный эффект. Однако, к слову о качестве наблюдений и в связи с результатами Рис. 3.5 приведём-таки некоторые примеры. Вне всяких сомнений, качество наблюдений очень сильно отражается на качестве данных — в данном случае, данных по вариациям солнечной активности. Работа [121], например, посвящена изучению ясности неба в современную эпоху. Автором [121] исследуется рассеяние поступающей солнечной радиации атмосферными, вулканическими аэрозолями, производятся количественные оценки, показано, что сильные вулканические извержения отразились на ясности неба. Автор [221] и [222] исследует степень хаотичности данных по солнечной активности за несколько столетий методом вычисления вейвлет-энтропии. Результаты этих работ показывают, что степень хаотичности данных в прошлом была значительно выше, чем в современную эпоху. И объясняется это не физическими причинами, а именно недостаточно хорошим качеством наблюдений в прошлом. Условия наблюдений играют далеко не последнюю роль в качестве получаемых рядов, что особенно заметно в исторических рядах, содержащих записи о наблюдениях в прошлом, часто — невооружённым глазом, без применения техники. Например, такое природное явление, как облачность, играет немаловажную роль как в наблюдениях невооружённым глазом, так и с использованием наземных телескопов недостаточно высокого качества. Естественно, это касается главным образом наблюдений в прошлом.

Для примера можно сказать, что из двух наиболее популярных и часто используемых рядов солнечной активности — числа Вольфа и числа

групп пятен [252] — из их определения следует, что метеорологические условия сильнее отражаются на значениях чисел Вольфа, нежели на значениях количества групп солнечных пятен. Дело в том, что, как известно, числа Вольфа рассчитываются из учёта не только количества групп пятен, но также учитывается и количество отдельных пятен [101]:

$$R = k(10g + f), \quad k \approx 1, \quad (3.4)$$

где  $R$  — числа Вольфа,  $k$  — поправочный множитель, определяемый для каждой обсерватории индивидуально, вносящий поправки на параметры аппаратуры, используемой данной станцией, атмосферные условия и т. д.;  $g$  — число групп пятен;  $f$  — число всех пятен (отдельных и в группах).

Что касается вулканической активности, то при вулканическом извержении в атмосферу выбрасываются частицы, которые могут держаться в атмосфере Земли до нескольких лет ([206] и Раздел 4.1.3 данной диссертационной работы) и образуют тонкий квази-однородный слой в виде некой “пылевой завесы”, достаточно протяжённой территориально. Кроме того, если вулканических извержений происходит несколько подряд с небольшим интервалом времени, то может иметь место и кумулятивный эффект, вследствие чего пылевая завеса становится ещё менее прозрачной и более протяжённой по вертикали (и, возможно, по горизонтали — в зависимости от географического положения и интенсивности извержения этого вулкана и предыдущих). В отличие от облачности, которая, как правило, не является очень продолжительным явлением, протяжённое вулканическое пылевое облако может держаться долго. Таким образом, как атмосферная облачность, так и вулканическая деятельность, могут отразиться на качестве наблюдений солнечной активности, но именно вулканическая активность может отразиться на среднегодовых значениях солнечной активности. Это касается в первую очередь наблюдений, проводимых в прошлом, когда не только качество наблюдения солнечной активности с Земли было хуже, возможности аппаратуры — ниже, количество солнечных обсерваторий было значительно меньше, но и не существовало возможностей наблюдений солнечной активности с околоземных орбит, доступных исследователям уже в течение нескольких последних десятилетий.

Если предположение о воздействии вулканизма на качество измерений солнечной активности верно, то получается, что в рядах вариаций солнечной активности содержится вулканический сигнал. Кроме того, каче-

ство данных важно не только для прямых наблюдений, но и для реконструкций. Если реконструкция солнечной активности производилась на основании косвенных признаков, на наблюдениях которых также может сказываться вулканическая активность, то и ряд вариаций солнечной активности, полученный в результате реконструкции, будет содержать вулканический сигнал.

Таким образом, можно предположить, что реконструкции, сделанные на основании теоретических расчётов или же не основании нормировок по данным достаточно хорошего качества, будут расходиться с историческими данными, полученными методом наблюдений невооружённым глазом или же с помощью наземных телескопов недостаточно хорошего качества. В общем-то, примеры таких расхождений существуют. Рассмотрим некоторые из них.

Как отмечается в работе [164], реконструированный авторами [101] ряд групп солнечных пятен и описанный ими, в частности, в [101], расходится с рядом чисел Вольфа из базы данных SIDC именно до 1900 г.

В работе [219] рассматривается реконструкция солнечной активности с 1510 г. по данным о полярных сияниях, на качестве которых также могут сильно сказаться условия наблюдения и состояние атмосферы.

В качестве немного другой иллюстрации могло бы служить (если бы не фазовое соотношение, аналогичное наблюдаемому при когерентности на периодичности 32-64 года), например, наблюдение, что возникшие в спектре вейвлет-когерентности солнечной и вулканической активности (Рис. 3.5) сигналы на более высоких, чем соответствующие периодам 32-64 года, частотах приходятся по времени на наиболее яркие минимумы в вариациях солнечной активности: Минимум Маундера и Минимум Дальтона. Можно также выдвинуть предположение и о возможной связи “потерянного цикла” [119] солнечной активности перед началом Минимума Дальтона, в самом конце XVIII века, со всплеском вулканической активности, начавшемся приблизительно в это же время (Рис. 3.4, верхняя панель) и, вероятно, сказавшемся на качестве наблюдений солнечной активности. Надо сказать, что причины минимумов солнечной активности являются отдельным вопросом физики Солнца и нашли отражение в ряде работ, например [130, 131, 115, 274]. В работе [274] обсуждаются возможные “солнечные” причины минимума солнечной активности в конце XVIII века, не связанные с условиями наблюдений. В работе же [130] обсуждается солнечная активность в совокупности с вулканической

активностью и выдвигается предположение о вулканической активности, как косвенной (через условия видимости) причине некоторых из минимумов солнечной активности. В [131] тот же автор исследует вопрос поведения солнечной активности в XVII веке. В исследовании [115] затрагиваются вопросы связи полученных в результате наблюдений данных по солнечной активности (в частности, во время Минимума Маундера) с условиями видимости, которые могли сказаться на качестве данных, вследствие чего уровень солнечной активности — по наблюдениям — мог искусственно казаться ниже, чем он был в рассматриваемую эпоху на самом деле. Авторы [115] допускают в качестве одного из возможных объяснений низкого уровня солнечной активности во время Минимума Маундера именно не очень хорошие условия наблюдений.

- Цикличности, наблюдаемые в солнечной и вулканической активности, абсолютно реальны и оказались на близких частотах независимым образом. Такой эффект можно наблюдать, например, на частоте, соответствующей 11-летней периодичности в конце XX столетия. Два очень интенсивных вулканических извержения (Эль-Чичон (1982) в Мексике и Пинатубо (1991) на Филиппинах) произошли с интервалом времени 9 лет. Достаточно сильное извержение — вулкан Agung, — но возымевшее менее значительные климатические последствия, чем Эль-Чичон и Пинатубо, произошло в 1963г. в Индонезии (Таблица 4.2). Таким образом, вариации кривой  $DVI_{Global}$ , отражающей климатические последствия вулканических извержений, образовали цикл, близкий к 11-летнему циклу Швабе солнечной активности. Эта “случайно” возникшая цикличность может быть видна как в кривой вариаций  $DVI_{Global}$ , так и в вейвлет-спектре  $DVI_{Global}$  (Рис. 3.4). Вследствие такого совпадения, в спектре вейвлет-когерентности в конце XX века можно наблюдать сигнал на частоте, близкой к соответствующей квази-11-летней и квази-9-летней периодичности (Рис. 3.5).

В случае периодичности 32-64 года, в вейвлет-спектре как солнечной, так и вулканической активности наблюдается статистически-незначимый сигнал на соответствующей частоте. Вопрос такой и чуть более долгопериодной вариации, наблюдаемой в вулканизме, затрагивается в исследовании [29], посвящённом изучению извержений тропических вулканов за последние 6 веков. Таким образом, в качестве объяснения когерентности между вулканической и солнечной активностью, наблюдаемой до 1900 г. на периодах 32-64 года, чисто теоретически (но с учётом приведённых “за” и “против”), все три вышеобсуж-

даемые гипотезы имели бы право на существование, если бы не наблюдаемое фазовое соотношение. Учитывая его, можно сделать вывод, что, вероятнее всего, причиной такой явной когерентности между солнечной и вулканической активностью до 1900 года на частотах, соответствующих 32-64-летней периодичности, является случайное совпадение частот, на которых в рассматриваемых рядах наблюдаются независимые друг от друга цикличности. То же самое о причине наблюдаемой когерентности — можно сказать и о когерентности на квази-11-летней периодичности в начале XVII, начале XIX и конце XX столетия.

Как видно из Рис.3.5, кроме вышеперечисленных когерентностей, существуют когерентности, которые наблюдаются на некоторых, очень коротких интервалах времени: например, в окрестности 1830 г. — на периодах от 4 до 12 лет. Фазовые соотношения — либо ряды находятся в фазе, либо вулканическая активность чуть опережает солнечную (на 1-2 года), как в случае 1830 г. Здесь может быть два объяснения таким фазовым соотношениям: либо имеет место случайное совпадение частот, либо на качестве наблюдения солнечных пятен сказалось воздействие вулканической пылевой завесы вследствие извержения. В данном случае, учитывая, что уровень  $DVI_{Global}$  был в это время очень высоким (Рис. 3.4, верхняя панель), пылевое облако могло повлиять на условия наблюдений солнечной активности, вследствие чего второе объяснение наблюдаемой когерентности представляется очень вероятным.

### 3.5 Выводы к Главе 3

Ниже приведено краткое резюме **результатов**, полученных в Главе 3:

- **солнечная активность:** в данной Главе было проиллюстрировано, что в вариациях солнечной активности (число групп солнечных пятен) наблюдаются особенности, важные в контексте данного исследования:
  - амплитуда известного 11-летнего цикла Швабе солнечной активности заметно увеличилась во второй половине XX столетия;
  - на частоте, соответствующей периодам 64-128 лет (цикл Гляйсберга), наблюдается статистически-незначимый, но устойчивый сигнал в интервале времени 1700-1900;
  - на частоте, соответствующей периодам 32-64 года (частоты, близкие к климатическому циклу Брикнера), наблюдается статистически-незначимый, но устойчивый сигнал после 1930г., однако, этот временной интервал находится вне “конуса доверия”, вследствие чего

нельзя с уверенностью говорить о его наличии на самом деле, а не как артефакта, вызванного краевыми эффектами, возникающими вне “конуса доверия”;

- **вулканическая активность:** в данной Главе было показано, что вариации климатических последствий вулканических извержений (индекс *DVI*) образуют “островки” спонтанно возникающих — благодаря “случайно” сложившимся последовательностям вулканических извержений — периодичностей:

- во второй половине XVIII, в первой половине XIX века и во второй половине XX века — на частоте, соответствующей 9-11-летней периодичности и меньшим периодам;
- в первой половине XIX века — кроме того, на квази-16-летней периодичности;
- в середине XVII столетия — пара небольших “островков” на периодичностях 4-8 лет;
- на протяжении всего рассматриваемого в данном случае интервала времени (1600-2000) на периодичности 32-64 года наблюдается статистически-незначимый, но устойчивый сигнал;
- в интервале времени 1920-1960 гг. отсутствовала вулканическая активность, повлекшая атмосферные, климатические изменения, которые могли бы повлиять на величину индекса *DVI*.

- **когерентность солнечной и вулканической активности:**

- на периодичности 32-64 года наблюдается ярковыраженная статистически-значимая когерентность между вулканической и солнечной активностью с запаздыванием солнечной активности относительно вулканической на 8-16 лет. Такая когерентность, вероятнее всего, является следствием случайного совпадения содержащихся в рядах частот;
- в конце XX столетия наблюдается когерентность между вулканической и солнечной активностью с небольшим запаздыванием вулканической активности относительно солнечной по фазе. И хотя данная область находится вне “конуса доверия”, из соотношения кривых видно, что такая когерентность имеет место в реальности по причине случайного совпадения частот;



- на более высоких частотах (периоды от 2 до 8 лет) когерентности наблюдаются на некоторых, очень коротких интервалах времени: например, в окрестности 1830 г. — на периодах от 4 до 12 лет. В случае 1830 г. солнечная активность запаздывает относительно вулканической на 1-2 года — вероятно, имеет место либо случайное совпадение частот, либо воздействие вулканической пылевой завесы на качество наблюдения солнечных пятен.

Из результатов, полученных в Главе 3, можно сделать следующие

**ВЫВОДЫ:**

- наблюдаемая на периодах 32-64 года когерентность между вулканической и солнечной активностью может объясняться влиянием последствий извержений вулканов на условия наблюдения Солнца. Однако, фазовое соотношение при этом, говорит скорее в пользу объяснения наблюдаемой когерентности случайным совпадением частот;
- когерентность между солнечной и вулканической активностью в конце XX столетия объясняется случайным совпадением периодического солнечного 11-летнего цикла и случайно сформированного вулканического 9-летнего цикла.

## Глава 4

# Солнечная, геомагнитная, вулканическая активность и глобальные изменения климата на 11- и 22-летних масштабах

Что касается существования внешних причин некоторых периодичностей, наблюдаемых в приземных температурах воздуха, то выявление какого-либо климатического процесса как причины наблюдаемой климатической вариации не отменяет возможности внешнего воздействия: напротив, как уже говорилось в Главе 2, вполне допустимо воздействие внешних (космических, солнечных) факторов на приземные температуры через изменение параметров верхней атмосферы. Например, Северо-Атлантическая Осцилляция, облачность, глобальная атмосферная циркуляция могут реагировать на внешние воздействия — с одной стороны, и оказывать влияние на параметры нижней атмосферы — с другой, являясь, тем самым, своего рода “посредниками” в механизме воздействия внешних факторов на нижнюю атмосферу Земли и, в частности, на приземную температуру воздуха (Глава 2).

### 4.1 Введение к Главе 4

В этом Разделе приведён краткий обзор результатов исследований роли солнечной, геомагнитной и вулканической активности в вариациях климата Земли. Обсуждаются предполагаемые физические механизмы воздействия внешних факторов на климат.

#### 4.1.1 История исследования возможного воздействия вариаций солнечной активности на климат Земли

Вопрос о возможности влияния на климат Земли вариаций, а также резких всплесков и спадов солнечной активности занимает исследователей уже достаточно давно. В последние десятилетия эта область наиболее активно развивается по нескольким направлениям: воздействие на верхнюю атмосферу, облачность, Северо-Атлантическую Осцилляцию (North Atlantic Oscillation, NAO), Эль-Ниньо, состояние нижней атмосферы и, в частности, приземную температуру. Например, в работах [189, 16] исследуются линейные корреляции между космическими параметрами (в особенности, потоками космических лучей и Солнечными Протонными Событиями (СПС)) и циркуляцией нижней атмосферы, а также обсуждаются возможные физические механизмы воздействия “космической погоды” на состояние и циркуляцию нижней атмосферы. Кроме того, в настоящее время прорабатываются различные физические механизмы воздействия солнечной активности на климат (краткий обзор которых приведён в Разделе 4.1.2), а также выявляются наиболее вероятные агенты, через которые это воздействие осуществляется.

В работах [100, 38] приводятся обзоры результатов по исследованию воздействий солнечной активности на климат.

Поскольку климат является сложной пространственно-распределённой динамической системой, со множеством нелинейностей, то явно выделить влияние чего-либо внешнего на неё не является легко решаемой задачей. В связи с этим среди множества современных работ на тему влияния солнечной активности на климат Земли в современную эпоху можно выделить, соответственно, два основных направления, основанных на наиболее перспективных способах решения этой задачи:

- *разработка физических механизмов и численное моделирование* — на основании предполагаемого физического механизма строится численная модель и делаются количественные оценки климатических последствий всплесков солнечной активности, после чего полученная модельная кривая сравнивается с реальной, экспериментальной кривой, и оценивается вклад внешнего воздействия в климатические процессы. В основном рассматриваются индивидуальные “солнечные” события и их последствия в атмосфере Земли;

Можно сказать, что это направление исследований посвящено поиску физических механизмов воздействия вариаций солнечной активности, а в частности — потоков космических лучей и Солнечных Протонных

Событий (СПС), на состояние, циркуляцию нижней атмосферы, формирование облаков. Основной “концептуальный” результат, полученный в ходе исследований линейными методами, состоит в том, что корреляции солнечной активности и климатических параметров Земли наблюдаются, но далеко не всегда, могут менять знак, пропадать и появляться в разные эпохи. Коэффициенты корреляции для ряда в целом при этом могут быть низкими. Таким образом, дальнейшие исследования могут осуществляться по следующим направлениям:

- исследование связи климата Земли с вариациями солнечной активности, основанные на анализе рядов данных, характеризующих рассматриваемые явления, с помощью нелинейных методов. Такой подход позволит выявить существующие корреляции и, если таковые имеются, исследовать их эволюцию;
  - построение физических моделей предполагаемого воздействия солнечной активности на климат Земли. Задав реальные значения входных — солнечных — параметров для такой модели и получив, соответственно, значения выходных параметров — параметры климата, можно сопоставить полученные климатические параметры с реально наблюдаемыми и получить ответ на вопрос, в какой степени реальные климатические значения определяются солнечной активностью.
- *исследование нелинейности, степени неустойчивости наблюдаемых в климатических данных длиннопериодных циклическостей и их связи с вариациями космических параметров* — эта задача затрагивает в основном зависимости на масштабах лет, десятилетий и столетий, а также включает исследование роли космических параметров в наблюдаемых климатических трендах.

В этой серии работ исследуются более длинные ряды климатических данных с целью выяснить, а подвергается ли вообще климат Земли воздействию вариаций солнечной активности, не только сезонных. Если “да”, то насколько это воздействие существенно и стационарно. Как видно из работ, описанных выше, большая часть авторов приходят к выводу, что такое воздействие имеет место. Но фактически, приводимые доказательства основаны лишь на относительно высоких коэффициентах линейной кросс-корреляции. Не стоит отбрасывать факт, что сами зависимости носят иногда противоположный по знаку характер.

Для разрешения наблюдаемых несоответствий, как правило, применя-

ются более сложные, нежели корреляционный анализ, нелинейные (или локально-нелинейные), методы (например, вейвлет-анализ (Раздел 1.1), метод разложения по эмпирическим модам (Раздел 1.2)), позволяющие выявить нелинейное поведение исследуемой системы, выделить нестационарные сигналы в рядах данных и проследить их эволюцию.

Далее приведён небольшой обзор основных результатов, полученных в области исследования воздействия вариаций солнечной активности на климат.

В обзоре [93] достаточно подробно изложена часть результатов исследований воздействия солнечной активности на климат Земли. Здесь приведены не только работы, уже вошедшие в “классические” обзоры, но также и другие работы по обсуждаемой тематике, имеющие прямое отношение к задачам данной диссертации.

Первые методичные и последовательные исследования возможности воздействия вариаций солнечной активности на состояние нижней атмосферы основывались на анализе экспериментальных данных сугубо линейными методами, корреляционным анализом рядов и на разложении рядов в Фурье-спектры с целью выявления доминирующих периодичностей. В результате был выявлен ряд закономерностей, однако без учёта нелинейности климатической системы и в предположении линейности воздействия. На основании результатов, полученных линейными методами, в настоящее время проводятся исследования, основанные на “нелинейном” подходе и использующие нелинейные либо локально-нелинейные методы исследования. Ниже приведены результаты исследований, осуществлённых разными методами, касающиеся различных “физических” процессов.

### **Обратное аэрозольное рассеяние**

Работа [14] посвящена, в частности, исследованию изменений прозрачности атмосферы и оптических свойств аэрозоля под воздействием вариаций и всплесков солнечной активности.

Прогнозирование параметров озонового слоя на XXI век приводится в [24]. Принимается во внимание 11-летний цикл солнечной активности, отражающийся в концентрации озона (примерно на 5% выше в годы максимумов солнечной активности [24]), а также моделируются ситуации в предположении вулканических извержений (интенсивности извержения вулкана Пинатубо (1991)).

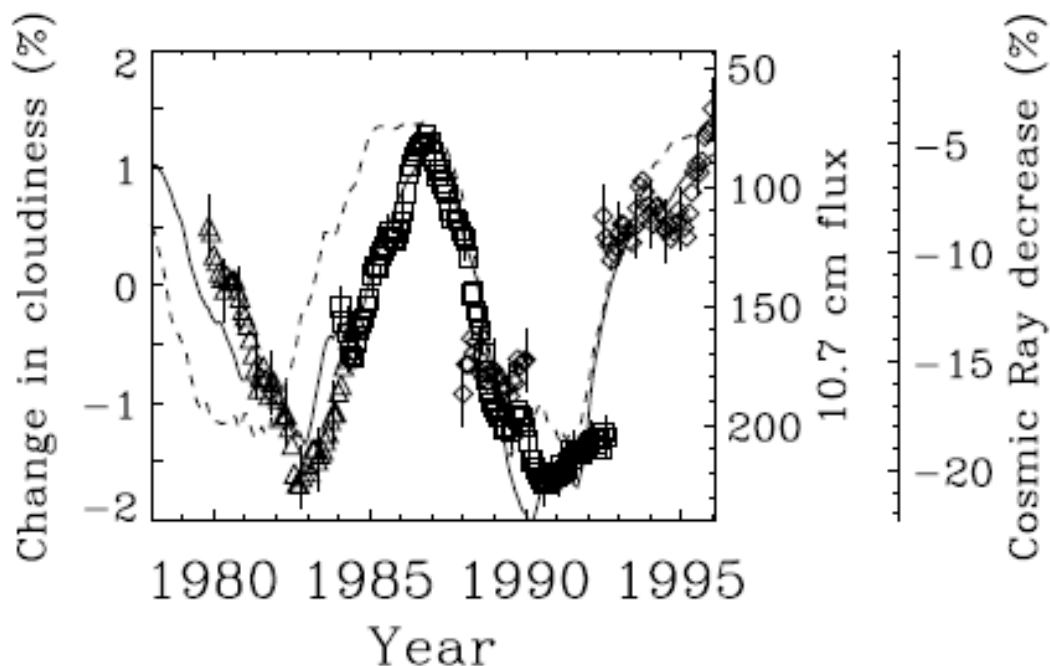


Рис. 4.1: Тотальная облачность и вариации интенсивности потока космических лучей (Рис. 1 в [236]).

### Облачность

Авторы работ [238, 236, 149, 150, 237] полагают, что в формировании облачности немаловажную роль играют потоки космических лучей. На Рис. 4.1 (Рис. 1 в работе [236]) приведён график вариаций тотальных значений облачности по спутниковым данным (*ISCCP*), вариаций радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см и вариаций потока космических лучей за интервал времени чуть меньший, чем последняя четверть XX столетия. Как видно из графика, кривые облачности и вариаций потоков космических лучей ведут себя похожим образом. Однако, это соотношение можно проверить только на двух циклах: возможности исследовать эффект на более длинном интервале времени на данный момент нет ввиду наличия необходимых для исследования данных начиная лишь с середины-конца 1970-х годов.

В работах [82, 93] рассматриваются предполагаемые механизмы воздействия вариаций интенсивности потоков космических лучей на облачность. Автором [82] делаются следующие выводы:

- изменение общей светимости — возможен слабый эффект;
- изменение *УФ*-радиации — возможно смоделировать декадные вариации,

кроме того: на больших высотах эффект наблюдается систематически, около поверхности - менее;

- изменения потоков энергичных частиц: изменение интенсивности потоков космических лучей может привести к дополнительному образованию ядер конденсации — возможен сильный эффект, внедрение энергичных электронов сказывается на содержании озона — возможен эффект, сопоставимый с эффектом изменения  $УФ$ -радиации;
- все вышеперечисленные механизмы могут работать вместе, не исключая и воздействия растущей концентрации парниковых газов.

Автор [237] говорит в своей работе о значимости вариаций магнитной активности Солнца для колебаний климата на различных временных масштабах. Обсуждается механизм воздействия вариаций магнитной активности Солнца через вариации интенсивности потоков космических лучей на облачность путём образования дополнительных ядер конденсации облаков. Этот механизм, по мнению автора [237], может играть роль в вариациях климата на декадных, вековых и тысячелетних масштабах.

В работе [264] исследуется разница в откликах облачности разных высот и для разных типов климатов на вариации солнечной активности, а также обсуждается вопрос о том, какой именно механизм воздействия, какой фактор ( $УФ$  или космические лучи) работает в тех или иных случаях. В результате авторами было установлено, что для низких облаков большую роль играет  $УФ$  — над океанами и сухим континентальным климатом и космические лучи — в средних и высоких широтах океанов и над поверхностью с влажным климатом с высокой концентрацией аэрозолей в атмосфере; для высоких же облаков — большую роль играют космические лучи над океанами и континентами с влажным климатом.

#### **Климат Северной Атлантики и Северо-Атлантическая Осцилляция (NAO). Климат Тихоокеанского региона и Эль-Ниньо.**

В работе [135] обсуждается связь Северо-Атлантической Осцилляции (North-Atlantic Oscillation, NAO) с солнечной активностью. В [261] исследуется вариации приповерхностного атмосферного давления в зоне Северной Атлантики, а также возможность их связи с вариациями солнечной активности и интенсивности потоков космических лучей. Работы [262] и [263] посвящены изучению роли СПС в формировании циклонов в Северной Атлантике.

Авторы [41] обнаружили связь между периодами высокой геомагнитной активности (суммарный  $K_p$ -индекс) и положительными фазами  $NAO$ . Обсуждается зависимость от уровня геомагнитной и солнечной (числа Вольфа) активности пространственного распределения тропосферного давления и отклонений температур на геопотенциалах 1000 mb и 100 mb зимой в Северном полушарии вдоль вертикальных профилей “Атлантика-Полярные регионы-Восточная Азия” и “Европа-Полярные регионы-Тихий океан”. Авторы предлагают объяснение наблюдаемых явлений с позиции распространения гравитационных волн и изменений в “Глобальной Электрической Сети” (“*Global Electric Circuit*”, см. Раздел 4.1.2).

Авторами [5] исследуется роль солнечной активности в формировании аномального течения *El-Niño*. В результате анализа данных было показано, что за 1-2 месяца до резкого уменьшения значений Southern Oscillation Index ( $SOI$ ), соответствующего началу Эль-Ниньо  $ENSO$ , наблюдается рост значений геомагнитного индекса  $AE$ , а также увеличение (приблизительно на 20%) среднемесячных значений чисел Вольфа. Кроме того, авторами отмечается, что рост среднесуточных значений южной компоненты Межпланетного Магнитного Поля ( $B_z$ -компоненты  $ММП$ ) в тёплые годы коррелирует со сменой генерального направления приземного ветра в Антарктике с нормального на аномальное, с запаздыванием 1-2 дня смены направления ветра относительно всплеска геомагнитной активности по данным индекса  $AE$ . Также наблюдается связь между значениями  $SOI$  и количеством геоэффективных солнечных вспышек. Автор [46], как уже отмечалось в Главе 2, исследует глобальную температуру приповерхностных океанских вод (Global Sea-Surface Temperature,  $SST_{Global}$ ) и приходит к выводу о том, что геомагнитная активность, путём воздействия на тепловой баланс атмосферы и перераспределение давления, провоцирует муссоны, ливни, в Индийском океане, а также инициирует такое мощное явление, как *El-Niño* и воздействует на  $NAO$ . А *El-Niño* и  $NAO$ , в свою очередь, влияют на  $SST$  в разных частях планеты, вследствие чего изменяется и  $SST_{Global}$ . Автор [27], исследуя вариации глобальной температуры за 130 лет (работа 1994 года), обнаружил в данных по глобальной температуре приповерхностных вод океана квази-3-5-летние колебания в Тихоокеанском регионе Эль-Ниньо и квази-10-летние колебания в Экваториальной Атлантике.

Работа [267] посвящена исследованию соотношений между вариациями солнечной активности (число солнечных пятен) и глобальным потеплением, глобальной температурой поверхности океанов (Global Sea-Surface Temperature,  $SST_{Global}$ ), *El-Niño*. В результате, автор приходит к выводу о



том, что небольшое, порядка 0.04%, изменение значения солнечной постоянной может привести к изменению климатического режима. Часть энергии внутренних климатических вариаций усиливает внешний цикл. Возникает “нелинейный резонанс”, что приводит к тому, что 77-88-летние вариации, наблюдаемые в климате, становятся более интенсивными, что является немаловажным для глобального потепления.

В работе [71] проводится анализ вариаций  $K_p$ -индекса геомагнитной активности и интенсивности ураганов в Северо-Атлантическом регионе во второй половине XX столетия. Авторы делают вывод о том, что интенсификация ураганов происходит вследствие ионизации, вызывающей охлаждение верхней поверхности облаков и высвобождения тепловой энергии в верхней тропосфере.

В работе [178] исследуются общие моды в колебаниях солнечной ( $SSN$ ), геомагнитной ( $aa$ ) активности,  $NAO$  и приземной температуры воздуха в Европе на средних широтах ( $T_{Europe}$ ). В результате были выявлены схожие колебания на частотах, соответствующим следующим значениям периодов: 11.3 года —  $SSN$  и  $aa$ , 8 лет —  $aa$ ,  $T_{Europe}$  и  $NAO$ , 5.3 года —  $aa$  и  $T_{Europe}$ , 2.25 года —  $T_{Europe}$  и  $NAO$ .

*Результаты исследований по реконструированным данным.*

Авторы [43], на основании исследования реконструкций солнечной активности и климата Голоцена, произведённых по данным  $^{14}C$ ,  $^{10}Be$  на вековых и тысячелетних масштабах и данным о дрейфах льдов, делают вывод о том, что вариации солнечной активности воздействовали на климат всей субполярной Северо-Атлантической области в течение всего Голоцена. Авторы, кроме того, выдвигают предположение о том, что изменение гидрографии поверхности могло сказаться на глубинных водах Северной Атлантики, что потенциально могло предоставить дополнительные механизмы для усиления солнечных сигналов и переноса их глобально.

В [35] обсуждается обнаруженная авторами связь между солнечной активностью и изменениями климата по реконструированным за 100000 лет данным. Реконструкции солнечной активности проводились по изотопам  $^{10}Be$ , а климате — по изотопам  $^{18}O$ . В работе [37] с использованием реконструированных по изотопам  $^{10}Be$  данных о вариациях солнечной активности за 9000 лет исследуется роль солнечной активности в протяжённости дрейфов айсбергов в Северной Атлантике. Была установлена связь между обсуждаемыми процессами.

Автор [198] ассоциирует начало резкого изменения климата (похолодание) около 11200 лет назад (*Younger Dryas*) со спадом солнечной активности,

наблюдавшемся перед началом похолодания и сыгравшем роль “триггера”.

В работах [60, 32, 61] обсуждается полученный в [60] результат, состоящий, в частности, в обнаруженных авторами иррегулярных квази-100-летних вариациях в геомагнитной активности. Причём, как было установлено авторами, когда эти вариации имеют место, то они коррелируют с климатическими изменениями в Северо-Атлантическом регионе. Предложенное авторами объяснение этого феномена основано на механизме изменения климата вследствие изменений облачности, вызванных вариациями интенсивности потоков космических лучей, обусловленных изменениями геометрии геомагнитного поля.

*Результаты исследований по моделям.*

В работе [63], основанной на численных экспериментах с использованием атмосферно-океанической климатической модели, сфокусированных на исследовании климата во время Минимума Дальтона (в качестве модельной кривой цикла Гляйсберга солнечной активности взята синусоида с соответствующим периодом) показано, что совместное воздействие уменьшения “солнечной постоянной” и вулканических извержений в Европе приводит к переходу NAO в отрицательные фазы, что в свою очередь приводит к похолоданию в Европе. Меридиональная циркуляция также реагирует на вариации солнечного воздействия.

### **Индийские и Африканские муссоны, вариации уровня воды в Африканских озёрах и разливы реки Нил.**

Авторы работы [40] исследуют зависимость интенсивности Индийских муссонов от уровня солнечной активности. Было установлено, что индексы (7 из 7 рассмотренных индексов), характеризующие интенсивность муссонов, выше в годы высокой солнечной активности. В вейвлет-спектрах индексов наблюдается устойчивая полоса на периодичностях 8-16 лет. Эта полоса более “сильная”, “интенсивная” (амплитуда вейвлет-спектра выше) в периоды высокой солнечной активности в случае 6 из 7 рассмотренных индексов, характеризующих Индийские муссоны. Вывод о существовании связи между уровнем солнечной активности и интенсивностью Индийских муссонов подтверждает и исследование [44], в котором рассматривается эпоха позднего Голоцена. Согласно выводам автора [44], интенсивность Индийских муссонов не только меньше в годы низкой солнечной активности, но и их сезонная протяжённость ограничена.

В работе [234] показано, что в XX столетии максимумы уровня воды в озере Виктория (Восточная Африка) коррелируют с максимумами 11-летних

циклов солнечной активности и происходит это по причине возникновения аномальных осадков приблизительно за 1 год до максимумов солнечной активности. Колебания уровня воды в озере Виктория с периодами 4, 6, 8, 10, 13, и 15 лет, возникающие вне максимумов солнечной активности ассоциируются авторами с такими явлениями как El Niño и/или Indian Ocean Dipole событиями. Кроме того, по мнению авторов [234], колебания озера на периодах 4, 6, 8 и 10 лет были наиболее ответственны за “распад” связи уровня воды в озере с солнечной активностью в середине XX века; а наблюдаемая в связи между солнечной активностью и ливнями в Восточной Африке нестабильность отражает изменения в “чувствительности” сложной климатической системы к солнечному воздействию. Наиболее вероятно, что это происходит из-за изменений в “граничных условиях” земного происхождения, например, из-за изменений времени начала сезона непродолжительных дождей. По результатам исследования у авторов [234] не возникает сомнений в существовании воздействия солнечной активности на климат Земли.

В исследовании [233] обсуждаются изменения уровня воды в озере Виктория (Восточная Африка) в течение всего Малого ледникового Периода по реконструированному (по диатомовой водоросли) данным. Было установлено, что на протяжении почти всего Малого Ледникового Периода уровень воды был достаточно высоким (приблизительно 600-200 BP) с несколькими периодами, даты которых были установлены, когда уровень становился чуть ниже. По мнению авторов, корреляция вариаций уровня воды в озере Виктория с солнечной активностью наблюдалась на протяжении всего тысячелетия. Однако, приблизительно 200 лет назад знак этой корреляции изменился на противоположный.

В работе [79] (1982г.) исследованы 290 записей осадков и вариации солнечной активности. Автором было установлено, что хотя цикличности, близкие по периодичностям к солнечным, и наблюдаются в осадках, однако если рассматривать широкие географические диапазоны, то корреляции выявить не удаётся. На некоторых станциях наблюдались корреляции на периодах 66 и 26 месяцев, но иррегулярные и пространственно очень изолированные. Линейных же корреляций на периодах 22 и 11 лет обнаружить не удалось. В то время как воздействие солнечной активности на процессы в ионосфере и экзосфере Земли не подлежит сомнению, воздействие солнечной активности на тропосферу Земли остаётся “под вопросом” и требует дальнейшего исследования. Основываясь на результатах проведённого исследования, автор [79] исключает возможность прямого воздействия солнечной активности на осадки. Однако, он допускает нелинейное воздействие.

Авторы [272] описывают обнаруженную ими весьма интересную связь между уровнем воды в озере Виктория (Восточная Африка) и наблюдаемыми в солнечной активности циклическими — Гляйсберга (вековой) и Вольфа (квази-11-12-летней). После окончания эпохи высокой солнечной активности во время цикла Гляйсберга наблюдался резкий рост уровня воды в озере Виктория, после чего, в течение одного цикла Вольфа — постепенное снижение уровня, а затем — постепенный рост синхронно вариациям солнечной активности до момента начала следующей эпохи высокой солнечной активности в цикле Гляйсберга. Результаты исследования на примере озера Виктория обобщаются авторами [272] на приэкваториальные озёра вообще. Используя результаты исследования, автор [272] делает некоторые прогнозы относительно засух и наводнений.

**Отражаются ли периодичности, наблюдаемые в солнечной активности, в климате Земли? “За” и “против”.**

Однако, в исследовании воздействия солнечной активности на климат очень много “подводных камней”.

Сомнения могут возникать в таком “базовом” для любого исследования, связанного с анализом экспериментальных данных, вопросе, как корректность использования данных: какие-то наблюдаемые в исследуемых рядах закономерности, циклическости и тренды могут иметь, например, объяснение, связанное со способом получения этих данных. К примеру, в работе [74] ставится под вопрос физическое происхождение наблюдаемого в данных по глобальной облачности (изменение общего количества облаков) (*ISCCP*) тренда.

Авторы [257] пытаются установить, не является ли артефактом наблюдаемая корреляция между облачностью и вариациями солнечной активности. Как и в работе [74], авторы также допускают необходимость внесения поправки в данные по облачности, связывая это с особенностями используемой аппаратуры. Кроме этого, один из результатов [257] говорит о взаимодействии облаков, находящихся на разных высотах, без учёта которого (различного, в зависимости от географической широты) нельзя анализировать связь облачного покрова с вариациями интенсивности потоков космических лучей.

В работе [64] автором обсуждаются спорные данные и их обработка, подходы, методы, выводы в работах, посвящённых исследованию воздействия солнечной активности на климат Земли, в частности, на облачность, описанных в [83, 123] и [124]. Наименее обоснованными, по мнению автора [64], являются следующие встречающиеся в проанализированных автором [64] ра-

ботах моменты:

- не всегда корректное “добавление” недостающих данных , чтобы покрыть нужный интервал времени;
- применение неприемлемых в данной ситуации (с точки зрения автора [64]) методов предварительной обработки данных;
- обнаруженные невязки в результатах по связи облачности с уровнем солнечной активности и интенсивностью потоков космических лучей, даже опубликованные в одной из работ, в последующих могут не упоминаться;
- при рассмотрении трёх циклов Гляйсберга получается, что первый цикл больше третьего, но именно третий, по времени подходящий к эпохе глобального потепления, связывается — как нечто исключительное — с наблюдающимся глобальным потеплением.

С другой стороны, автор [125], исследуя получаемые разными исследователями в области воздействия солнечной активности на климат Земли корреляции, приходит к выводу, что, несмотря на не всегда приемлемые в исследуемой ситуации методы и не всегда корректное их применение, вероятность того, что влияния нет — очень небольшая. То есть, эффект воздействия солнечной активности на климат Земли, вероятнее всего, есть. Кроме того, в пользу этого говорит тот факт, что среди предлагаемых физических механизмов этого воздействия есть вполне физически обоснованные и претендующие на реальность по количественным оценкам. Но, конечно же, требуется дальнейшее исследование.

Вообще говоря, часто в работах разных авторов приводятся доводы в пользу прямо-таки противоположных интерпретаций получаемых результатов, основанные на весьма убедительных аргументах. Это связано с особенностью тематики: на данном этапе исследований, далеко не всегда возможно утверждать с уверенностью, что та или иная наблюдаемая между двумя процессами корреляция является результатом воздействия первого фактора на второй или наоборот. Чаще всего та или иная интерпретация основана на возможности физического обоснования этого влияния. Ниже приведены примеры таких исследований.

В работе [185] обсуждается 11-летний цикл в климате и его связь с аналогичным циклом в геомагнитной активности, в работах [56, 57] выявленная *EMD*-методом (Раздел 1.2) квази-11-летняя периодичность в температурных

данных и данных по высотам геопотенциалов интерпретируется авторами как имеющая солнечное происхождение.

Существует немало работ, интерпретация результатов которых говорит в пользу наличия воздействия солнечной активности на климат. Конечно, остаётся возможность совпадения. Таким примером являются аргументы, приводимые в работе [49] — весьма весомые аргументы в пользу того, что солнечная активность отражается в рядах климатических данных на больших масштабах. Эта работа уже упоминалась выше: авторами были произведены оценки разницы среднегодовых значений глобальной приземной температуры воздуха для лет солнечных максимумов и солнечных минимумов. Разница составила  $0.2^\circ K$ : среднегодовая глобальная температура в годы максимумов оказалась выше, чем в годы минимумов. Автор [266] исследует воздействие солнечной активности и вулканической деятельности на вариации температуры в Северном полушарии в интервале времени 1000-1850 гг. по реконструированным данным и результатам моделирования. В результате, было установлено, что в доиндустриальную эпоху солнечная активность воздействовала на климат Земли на декадных масштабах, а вулканическая активность — на более коротких.

Как уже обсуждалось в Главе 2 (Раздел 2.1.3), во второй половине и в конце XX столетия проблема воздействия вариаций космических параметров на атмосферу Земли стала особенно актуальной в контексте исследования роли солнечной активности в глобальном потеплении. Вопрос о причинах глобального потепления по-прежнему открыт. В частности, не может ли глобальное потепление быть вызвано естественными факторами — внешними или климатическими, — например, ростом уровня солнечной активности, а роль антропогенного фактора — второстепенна? Причина возникновения такой гипотезы кроется в том, что уровень солнечной активности резко возрос за последние декады, а глобальное потепление заметно усилилось также в течение последних нескольких десятилетий. Из Рис. 3.1 можно видеть, что амплитуда вариаций солнечной активности резко возросла во второй половине XX века. Кроме того, по результатам реконструкций солнечной активности, авторы [252] и [255] выдвигают предположение, что уровень солнечной активности после 1940-х годов необычайно высок по сравнению с уровнем за всё последнее тысячелетие. Более того, авторами [227] утверждается в результате исследования, что такого высокого уровня солнечной активности не было за прошедшие 11000 лет. Этот результат обсуждается в [166, 228] В ряде работ (например, [17, 18]) предпринимаются попытки смоделировать вклад в аномальное потепление климата второй половины XX столетия не только

антропогенного воздействия, но и солнечной активности. В результате реализованного авторами [17, 18] исследования, на моделях было установлено, что если до середины XX столетия вклад солнечной активности неплохо объяснял вариации приземной температуры, то после — нет, а с учётом антропогенного фактора результат становился лучше.

Однако, хоть и предлагаются достаточно физически обоснованные механизмы воздействия солнечной активности на климат Земли, наличие этого эффекта на масштабах от нескольких лет до десятилетий и трендов нельзя считать полностью доказанным, проблему нельзя считать решённой даже в аспекте доказательства факта влияния на климат каких-либо внешних факторов, а тем более — в аспектах деталей механизмов воздействия, если таковое существует, его стабильности во времени и распределения по планете. Остаётся возможность, что наблюдаемые в рядах климатических данных периодичности вызваны внутренними колебаниями климата, а не внешними воздействиями [162]. Кроме работ, авторы которых склоняются считать, что солнечная активность оказывает влияние на колебания климата, существует немало работ, в которых авторы весьма аргументированно обосновывают наблюдаемые в климате цикличности без привлечения солнечной активности в качестве их причины.

Например, авторы работы [160], исследуя связь между такими климатическими индексами/процессами как *QBO* (Quasi-Biennial Oscillation), *AO* (Arctic Oscillation), *SOI* (Southern Oscillation Index), *ENSO* (*El-Niño* Southern Oscillation) и вариациями солнечной активности по экспериментальным данным, делают вывод, что на масштабах от двух лет до десятилетий солнечная активность не оказывает влияния на вышеперечисленные климатические параметры, в то время как между климатическими индексами связь наблюдается. Наблюдаемая же квази-11-летняя периодичность в некоторых рядах климатических данных может объясняться отклонениями от природной 14-летней цикличности, либо наложением нескольких естественных периодичностей.

Авторы [133] показывают, что в доиндустриальную эпоху и в первые 20 лет XX века воздействие солнечной активности на климат имело место, во второй же половине XX столетия направление трендов в солнечной активности противоположно тому, которое могло бы объяснить наблюдаемый в климатических данных тренд.

Из всего вышеописанного можно предположить, что, возможно, воздействие солнечной активности отражается на климате, но является достаточно слабым, и далеко не всегда может быть выявлено. Это может объяснить про-

творечивость результатов исследования воздействия солнечной активности на климат Земли, изложенные в разных работах.

Таким образом, принимая во внимание всё обсуждаемое выше в этом Разделе, а также в Главе 2, можно предположить, что квази-11-летний сигнал во многих климатических рядах присутствует, но он очень нестационарен, из чего возникает два принципиальных вопроса:

- являются ли причиной наблюдаемого в некоторых климатических рядах квази-11-летнего сигнала вариации солнечной активности, или же причиной являются какие-либо другие внешние факторы, либо наблюдаемая периодичность — результат чисто внутри-климатических процессов, и
- является ли наблюдаемая периодичность, а также (если таковые имеются) отклики на внешние воздействия — глобальными, наблюдается ли временная и географическая нестационарность сигнала, если “да”, то чем она может объясняться?

#### **4.1.2 Вариации солнечной активности и приземная температура. Возможные механизмы воздействия**

Предполагаемые механизмы воздействия вариаций солнечной активности на приземную температуру, в целом, те же самые, что и в случае облачности (см. Раздел “Облачность” 4.1.1 в 4.1).

Солнечная активность может проявляться в приземной температуре через вариации общего солнечного излучения и/или ультрафиолетовой радиации, либо через галактические космические лучи, вариации которых находятся в противофазе с солнечной активностью [93].

- Вариации солнечного излучения (солнечной постоянной) изменяются синхронно с циклом солнечной активности, что не может не отражаться на энергетическом балансе всей атмосферы. Однако в количественном отношении, 11-летние вариации светимости составляют всего лишь доли процента от фона [93].
- Амплитуда солнечной ультрафиолетовой радиации варьируется в 11-летнем цикле в большем диапазоне, чем интегральное излучение. Вариации ультрафиолета приводят к изменению химического состава и температурного баланса верхней атмосферы и через динамические процессы могут сказаться на состоянии тропосферы и приземной температуре



[105, 118].

- Вариации космических лучей, также модулируемые солнечной активностью, изменяют скорость ионизации нижней атмосферы. Это может привести к дополнительному образованию ядер конденсации и повлиять на радиационный баланс атмосферы [189, 242, 149, 150, 236]. Кроме того, изменения параметров глобальной электрической сети также может привести к изменению в аэрозолях, облачности и температуре.

Следует отметить, что вышеперечисленные физические механизмы предполагаемого влияния солнечной активности на климат Земли на данный момент так до конца и не проработаны.

Какой из вышеперечисленных механизмов играет наиболее существенную роль в воздействии солнечной активности на климат Земли — по-прежнему предмет исследования многих. Например, авторы [107] обсуждают роль двух возможных факторов — потока солнечного излучения и флуктуаций интенсивности потоков космических лучей — в длиннопериодных вариациях тропосферных температур. В своей работе [107] авторы показывают, что тропосферные температуры вероятнее подвержены воздействию вариаций потоков прямого солнечного излучения, предположительно всплесков *УФ*-излучения, нежели всплескам космического излучения.

### 4.1.3 Вулканическая активность и её последствия в атмосфере и климате Земли

Другим внешним фактором, оказывающим воздействие на вариации приземной температуры воздуха, может служить вулканическая деятельность. Как продемонстрировано в обзоре [206], статье [225] и работах [30, 205, 207, 208, 210, 220], вулканизм является достаточно мощным фактором, способным вызывать изменение климатической ситуации на протяженной территории, а иногда и в планетарных масштабах (в зависимости от интенсивности извержения). Стратосферное вулканическое извержение способно изменить состояние как нижней, так и верхней атмосферы и далее привести к понижению глобальной температуры в течение последующего ряда лет (воздействие вулканической активности на климат неоднозначно и сложно, более подробно описано ниже). Вулканизм отражается на климате не только на кратковременных масштабах, но и на длительных. Например, работа [33] посвящена исследованию связи вулканизма и климата на тысячелетней временной шкале.

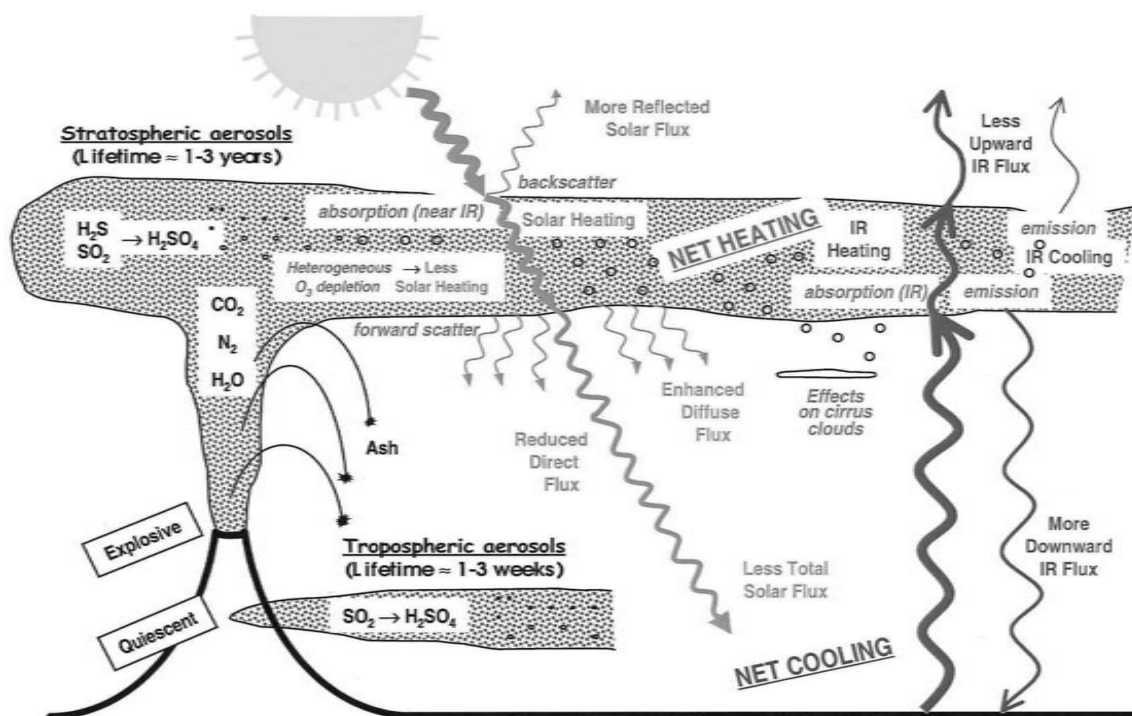


Рис. 4.2: Схема воздействия вулканических извержений на атмосферу и климат Земли [206].

На Рис. 4.2 приведена схема воздействия вулканических извержений на атмосферу и климат Земли [206].

Основная компонента вулканического извержения – магматический материал. Это твёрдые частицы, которые “выпадают” из атмосферы на Землю очень быстро: от нескольких минут до нескольких недель (в тропосфере). Небольшое количество частиц может “держаться” в стратосфере в течение нескольких месяцев, но вызываемое ими воздействие на климат очень малó [206]. Как было установлено некоторыми авторами ([206] и ссылки внутри), извержения вулканов Кракатау (1883) и Св. Елены (1980) вызвали врёмнное снижение амплитуды дневных изменений приповерхностной температуры воздуха в регионе, где присутствовали тропосферные облака.

Однако, этот эффект исчезает сразу же после выпадения частиц на Землю. Такое выпадение может быть весьма опасным, наиболее известным примером чего может послужить “погребение” под вулканической пылью, разрушение городов Помпеи и Геркуланиум после извержения Везувия в 79 г. н. э. [206].

Кроме магматического материала во время вулканических извержений в атмосферу извергаются газы, среди которых преобладают  $H_2O$  в виде водяного пара,  $N_2$  и  $CO_2$ . Согласно одной из теорий, вулканические извержения

сыграли ключевую роль в формировании современной атмосферы Земли после того, как первичная атмосфера была утеряна — унесена в космическое пространство

Водяной пар сконденсировался в океан, углекислый газ  $CO_2$  был переработан растениями в кислород  $O_2$  и углерод  $C$  — ископаемое топливо. Таким образом, состав современной атмосферы (78%  $N_2$  и 21%  $O_2$ ) — в прошлом, изначально, может иметь вулканическое происхождение [206].

Кроме того, эти газы являются “парниковыми”. Однако, считается, что ввиду высокой концентрации парниковых газов в атмосфере Земли, отдельные (единичные) извержения не играют существенной роли в развитии парникового эффекта [206].

Наиболее существенные последствия вулканических извержений в атмосфере Земли связаны с выбросом во время извержений различных разновидностей серы, в основном в виде оксида  $SO_2$  (сульфата), который реагирует с  $OH$  и  $H_2O$  на временных масштабах недель. Образующиеся при этом аэрозольные частицы  $H_2SO_4$  играют доминирующую роль в радиационном воздействии вулканических извержений на атмосферу Земли. Время полураспада составляет около 1 года, а радиационное воздействие происходит как на коротких, так и на длинных волнах [206].

Будучи однажды выброшенными в стратосферу, аэрозольные частицы больших и малых размеров, сформированные сульфатными газами, быстро (на временных масштабах недель) распространяются вокруг Земного шара.

Последующий перенос стратосферного вулканического облака во многом определяется распределением ветров в момент извержения. Причём, облака от высокоширотных извержений редко переносятся дальше средних широт того же полушария, где произошло извержение.

Нормальная опрокидывающая стратосферная меридиональная циркуляция поднимает аэрозоли в тропики, а затем — по направлению к полюсу и средним широтам, после чего — обратно в тропосферу в высоких широтах. Этот перенос происходит в течение одного года - двух лет.

Продолжающиеся слабые вулканические эмиссии, включая “курения” и эпизодические неинтенсивные извержения, добавляют в тропосферу сульфатных аэрозолей, но время их жизни гораздо меньше, чем у стратосферных аэрозолей [206].

Глобальные эмиссии вулканических аэрозолей в тропосферу составляют всего около 14% суммарного количества аэрозолей природного и антропогенного происхождения, но их относительный вклад в изменение радиационного баланса весьма значителен. Ввиду того, что жерла многих вулканов

находятся высоко, время жизни вулканических аэрозолей такого происхождения может быть больше, чем у антропогенных аэрозолей. По измерениям на земной поверхности, радиационное воздействие от вулканических аэрозолей, возникших в результате таких извержений, лишь немногим меньше, чем от аэрозолей антропогенного происхождения [206].

Основные аспекты изменения радиационного баланса из-за стратосферного вулканического облака состоят в следующем [206]:

- *прямое аэрозольное рассеяние*: частицы сульфатного аэрозоля взаимодействуют с поступающей солнечной радиацией, рассеивая её в направлении земной поверхности;
- *обратное аэрозольное рассеяние*: часть солнечного излучения рассеивается обратно в космос, отражаясь от сульфатного аэрозоля;
- вследствие этого планетарное альbedo Земли увеличивается, а количество солнечной радиации, достигающей земной поверхности, уменьшается.

Обратное аэрозольное рассеяние является причиной похолодания у поверхности Земли. Большая часть солнечной радиации подвергается прямому аэрозольному рассеянию, вследствие чего общее количество рассеянной солнечной радиации у поверхности Земли увеличивается.

По расчётам радиационного баланса для извержения Пинатубо (1991) некоторыми авторами [206] было установлено, что у верхней границы облака вулканического аэрозоля происходит нагревание атмосферы за счёт абсорбции солнечной радиации в области спектра, близкой к инфракрасной. И этот эффект доминирует над усилением инфракрасного охлаждения вследствие усиления эмиссии из-за наличия аэрозолей.

Таким образом, нижняя стратосфера нагревается за счёт абсорбции поднимающейся из тропосферы и с поверхности Земли длинноволновой радиации. Это нагревание зависит от распределения тропосферных облаков — но было установлено [206], что эта зависимость носит случайный характер и степень её воздействия меньше амплитуды нагревания.

В тропосфере наблюдаются небольшие радиационные эффекты, так как уменьшенный поток около-инфракрасной радиации (продуктирующий меньше абсорбции водяным паром в тропосфере) компенсируется дополнительным длинно-волновым излучением от аэрозольного облака.

На поверхности Земли значительное ослабление потока прямой коротковолновой радиации доминирует над направленными вниз диффузными коротко-

волновыми потоками и небольшими дополнительными идущими вниз длинноволновыми потоками от аэрозольного облака, за исключением областей в зоне полярной ночи, где нет солнечного света. Этот эффект похолодания является причиной так называемого *эффекта глобального похолодания* вследствие вулканических извержений [206].

Вследствие блокировки коротковолнового излучения и уменьшения испарения наступает эффект *уменьшения количества тропических осадков*. Этот эффект наступает не сразу, а через 1-3 месяца после извержения и длится от 3-х месяцев до полугода.

На примере извержения вулкана Пинатубо (1991) было установлено, что нагрев нижней стратосферы гораздо сильнее над тропиками, чем над полюсами. Образующийся широтный градиент в нагреве лежит в основе динамического отклика в атмосфере, приводящего к зимнему потеплению в континентальных зонах Северного полушария вследствие адвективных процессов, в зимнее время доминирующих над радиативными эффектами.

В некоторых работах рассматривается роль вулканических аэрозолей в формировании перистых облаков ([206]). Будучи установлена для индивидуальных случаев, роль вулканических аэрозолей, проникающих в тропосферу через тропопаузу, однако, не была оценена количественно на глобальном уровне.

Воздействие вулканической активности на погоду и климат может происходить на разных временных масштабах: от одного дня до одной сотни лет. И каждый тип последствий является предметом исследований. В работах [30, 152, 171, 184] исследуются кратковременные климатические последствия вулканических извержений на примере отдельных событий (в частности, извержений вулканов Св. Елены и Пинатубо), а также процесс формирования вулканического облака после извержения вулкана Лаки [173].

В Таблице 4.1 [206] приведён список основных последствий вулканических извержений в погоде и климате с описанием их механизмов и указанием продолжительности эффекта.

Примером *уменьшения амплитуды дневного цикла* может служить пример извержения вулкана Св. Елены (1980). Во время этого извержения в тропосферу было выброшено большое количество вулканической пыли. Образовавшийся аэрозольный слой изолировал – в смысле радиации – поверхность Земли от верхней атмосферы. Проведённые для этого извержения расчёты, основанные на анализе данных наблюдений и модельных оценок, метеорологических прогнозов, показали, что за счёт вулканических аэрозолей в г. Якима, находящемся в 135 км к востоку от вулкана, ночная приземная тем-

Таблица 4.1: Список основных последствий вулканических извержений в погоде и климате [206].

<b>Эффект</b>	<b>Механизм</b>	<b>Начало</b>	<b>Продолжительность</b>
<i>Уменьшение амплитуды дневного цикла</i>	блокировка коротковолнового излучения и эмиссии длинноволнового излучения	немедленно	1-4 дня
<i>Уменьшение количества тропических осадков</i>	блокировка коротковолнового излучения, уменьшенное испарение	1-3 месяц	3-6 месяцев
<i>Летнее похолодание в тропиках и субтропиках Северного Полушария</i>	блокировка коротковолнового излучения	1-3 месяц	1-2 года
<i>Стратосферное нагревание</i>	стратосферная абсорбция коротко- и длинноволнового излучения	1-3 месяц	1-2 года
<i>Зимнее потепление на континентах в Северном Полушарии</i>	стратосферная абсорбция коротко- и длинноволнового излучения, динамика	1/2 года	1 или 2 зимы
<i>Глобальное похолодание</i>	блокировка коротковолнового излучения	немедленно	1-3 года
<i>Глобальное похолодание от многих извержений</i>	блокировка коротковолнового излучения	немедленно	10-100 лет
<i>Недостаток озона, усиленное УФ</i>	растворение, гетерогенная химия аэрозолей	1 день	1-2 года

пература воздуха в среднем повысилась на  $8^{\circ}\text{C}$ , а дневная – понизилась на  $8^{\circ}\text{C}$  относительно прогнозируемой. Такой эффект наблюдался в течение нескольких дней. Однако, стоит заметить, что при заметном влиянии на локальную температуру, данное извержение оказало очень незначительное воздействие на осадки, атмосферную циркуляцию и глобальный климат ввиду того, что выброс сульфатных частиц в стратосферу был очень мал.

*Летнее похолодание в тропиках и субтропиках Северного Полушария.* Известно из наблюдений, что после интенсивных вулканических извержений приземная температура воздуха понижается. Прямое радиативное воздействие от поверхности в совокупности с ослаблением направленного вниз радиативного потока вызывает охлаждение поверхности.

В тропиках и средних широтах летом этот эффект является наиболее сильным из большей части всех имеющих место воздействий на климат, так как в этих зонах больше солнечного света (радиации), который блокируется. Однако, в некоторых случаях (как, например, в 1983 г. после извержения вулкана Эль-Чичон (1982)), что было установлено по наблюдениям, вулканическое воздействие в ряде регионов “перекрывается” воздействием сильного Эль-Ниньо [206].

*Стратосферное нагревание.* Известно из наблюдений, что вулканические извержения вызывают нагрев стратосферы. Как уже говорилось выше, это нагревание вызвано совокупным эффектом поглощения около-инфракрасного излучения в верху рассматриваемого слоя и излучения от земной поверхности – в низу рассматриваемого слоя [206]. В случае извержения вулкана Пинатубо (1991) амплитуда нагрева стратосферы была в 2 раза больше по сравнению с извержением вулкана Эль-Чичон (1982), что было вызвано суперпозицией направленного вниз тренда в температуре стратосферы из-за уменьшения содержания озона и увеличения содержания  $\text{CO}_2$ .

*Зимнее потепление на континентах в Северном Полушарии.* В результате основанного на экспериментальных данных исследования сезонного и широтного отклика климатической системы на 12 наиболее интенсивных извержений вулканов XX столетия было обнаружено [206, 210], что более тёплые (по отношению к средней температуре) зимы наблюдались на континентах в Северном полушарии, а более холодные – на океанах и Ближнем Востоке, в годы, когда зима является первой после тропического извержения и, в то же время, – второй после высокоширотного. В [210] было показано, что более значимую роль в воздействии на климат играют тропические извержения. В других работах было обнаружено, что следующие за извержениями зимы были холоднее относительно нормальных в районе полюсов обоих полушарий

[206].

Теоретическое объяснение эффекта зимнего потепления/похолодания в различных зонах основано на процессе поглощения коротко- и длинноволнового излучения в стратосфере в совокупности с динамикой атмосферы, тесно связано с тропосферной и стратосферной циркуляцией [206].

*Малый Ледниковый Период.* По некоторым предположениям вулканическая активность могла явиться причиной Малого Ледникового Периода, также как и ряда других холодных периодов в климате [206]. Причина кроется в том, что несмотря на то, что воздействие на стратосферу отдельно взятого интенсивного извержения в среднем длится 2-3 года (за исключением такого мощного извержения, как Тоба, произошедшего 71000 лет назад), серия извержений может повлечь более продолжительное похолодание, в декадном масштабе. Кроме того, когда после периода сравнительно активной вулканической деятельности, наступает период вулканического “затишья”, то климатическая система может среагировать на это потеплением. Такая ситуация наблюдалась в интервале времени с 1912 по 1963 гг. Более того, возможен эффект, состоящий в трансформации кратковременного воздействия вулканических извержений на климат в долговременное в результате “обратной связи”, вовлекающей льды и океан. Таким образом, воздействие вулканизма на климат Земли на масштабах десятилетий остаётся не очень ясным [206].

*Эль-Ниньо.* Вопрос о влиянии вулканических извержений на Эль-Ниньо остаётся открытым. На данный момент доказательств такового нет. Как описано автором [206], в некоторых работах даже выдвигается противоположное предположение: климатические изменения, через увеличение литосферных напряжений, могут провоцировать вулканические извержения. В других работах предполагается, что напротив, извержения провоцируют Эль-Ниньо вследствие похолоданий на континентах, которые вызывают муссоноподобную циркуляцию, инициирующую Эль-Ниньо. В работе [26] авторами показано, что вероятность возникновения Эль-Ниньо возрастает примерно в два раза в зимы, последующие за вулканическими извержениями. В работе [209] авторы не находят подтверждения воздействию вулканических извержений на Эль-Ниньо. Проведённые различными авторами исследования соотношений между вулканическими извержениями и Эль-Ниньо показали, что вероятнее всего, вулканическая активность не инициирует Эль-Ниньо [206].

*Стратосферный озон.* Химические реакции, вследствие которых рождается или разрушается озон  $O_3$ , зависят от  $УФ$ -излучения, температуры, наличия поверхностей для гетерогенных реакций. И все эти факторы изменяются под воздействием вулканических аэрозолей.



Реконструкции вулканической активности и её влияния на стратосферу и оптическую толщину по ледовым отложениям исследуются в [273].

## 4.2 Экспериментальные данные

Как уже говорилось, в данной работе для характеристики силы извержений используются два индекса: *VEI* (Volcanic Explosive Index) – для характеристики извержения как отдельного вулканического события, и *DVI* (Dust Veil Index) – для характеристики степени воздействия извержения на климат Земли. Описанные в этой Главе результаты проиллюстрированы на примере ряда глобальной температуры базы данных *NASA-GISS*.

## 4.3 Методология

В данной Главе, как и в предыдущей, к исследуемым рядам данных применяется вейвлет-анализ и анализ вейвлет-кросс-когерентности и фаз, описанные в части (1.1) Главы 1, позволяющие отслеживать неустойчивый, эволюционирующий сигнал в одном из рассматриваемых рядов, а также наличие и эволюцию когерентностей и фазовых соотношений между двумя исследуемыми рядами.

## 4.4 Обсуждение результатов

В данном Разделе обсуждаются когерентности, наблюдаемые между исследуемыми внешними факторами (солнечная, вулканическая и геомагнитная активность) и вариациями аномалий глобальной температуры. Цель такого исследования — установить, не связаны ли наблюдаемые в данных по глобальной температуре периодичности с вариациями внешних параметров; если “да”, то стационарны ли наблюдаемые когерентности или же существует временная зависимость в возникновении когерентностей; в случае, если такая зависимость наблюдается, то каков её характер и какими факторами она определяется; вызваны ли наблюдаемые зависимости вариациями каждого из рассматриваемых факторов в отдельности, имеет ли место воздействие комбинации нескольких факторов или же возможны оба варианта.

#### 4.4.1 Солнечная и вулканическая активность: комбинированное воздействие на климат Земли, как возможная причина квази-11-летней периодичности в рядах климатических данных конца XX столетия

В этом Разделе обсуждаются когерентности между солнечной, вулканической активностью и вариациями аномалий глобальной температуры на примере ряда базы данных *NASA-GISS* в контексте исследования возможных внешних причин наблюдаемого во второй половине XX столетия квази-11-летнего статистически-значимого сигнала в вариациях аномалий глобальной температуры (Рис. 2.3(В), Рис. 2.4(В), Рис. 2.5(В)).

Перед тем, как исследовать эти когерентности, приводится небольшое обсуждение относительного временного “расположения” кривых, характеризующих солнечную активность, глобальный отклик климата и реакцию прозрачности атмосферы на вулканическую деятельность, дат интенсивных вулканических извержений и вариаций аномалий глобальной температуры.

Рис. 4.3 иллюстрирует поведение солнечной, вулканической и геомагнитной активности за рассматриваемый период времени.

Итак, в следующих Разделах обсуждаются наблюдаемые между кривыми солнечных, вулканических факторов и аномалиями глобальной температуры соотношения.

##### **Вариации солнечной активности и глобальная температура**

На Рис. 4.3 (верхняя панель) хорошо видны 11-летние вариации солнечной и геомагнитной активности. Отметим при этом, что амплитуда цикличности Швабе солнечной активности меняется на протяжении всего исследуемого интервала времени. Циклы с самой большой амплитудой наблюдаются в 1940-1960 гг., с немного меньшей — после 1980 г. В начале XX столетия амплитуды 11-летних вариаций сравнительно малы.

##### **Вариации вулканической активности и глобальная температура**

На Рис. 4.4 приведён спектр вейвлет-когерентности индекса  $DVI_{Global}$  – воздействия вулканической активности на климат – и изменений прозрачности атмосферы  $\tau$ , принцип расчёта которой приведён в [214] (работа 1993 г., данные впоследствии обновлялись, и в настоящее время среднемесячные значения прозрачности атмосферы  $\tau$  на  $550nm$  с 1850 г. по 1999 г. доступны в базе данных *NASA-GISS* в Интернете на сайте

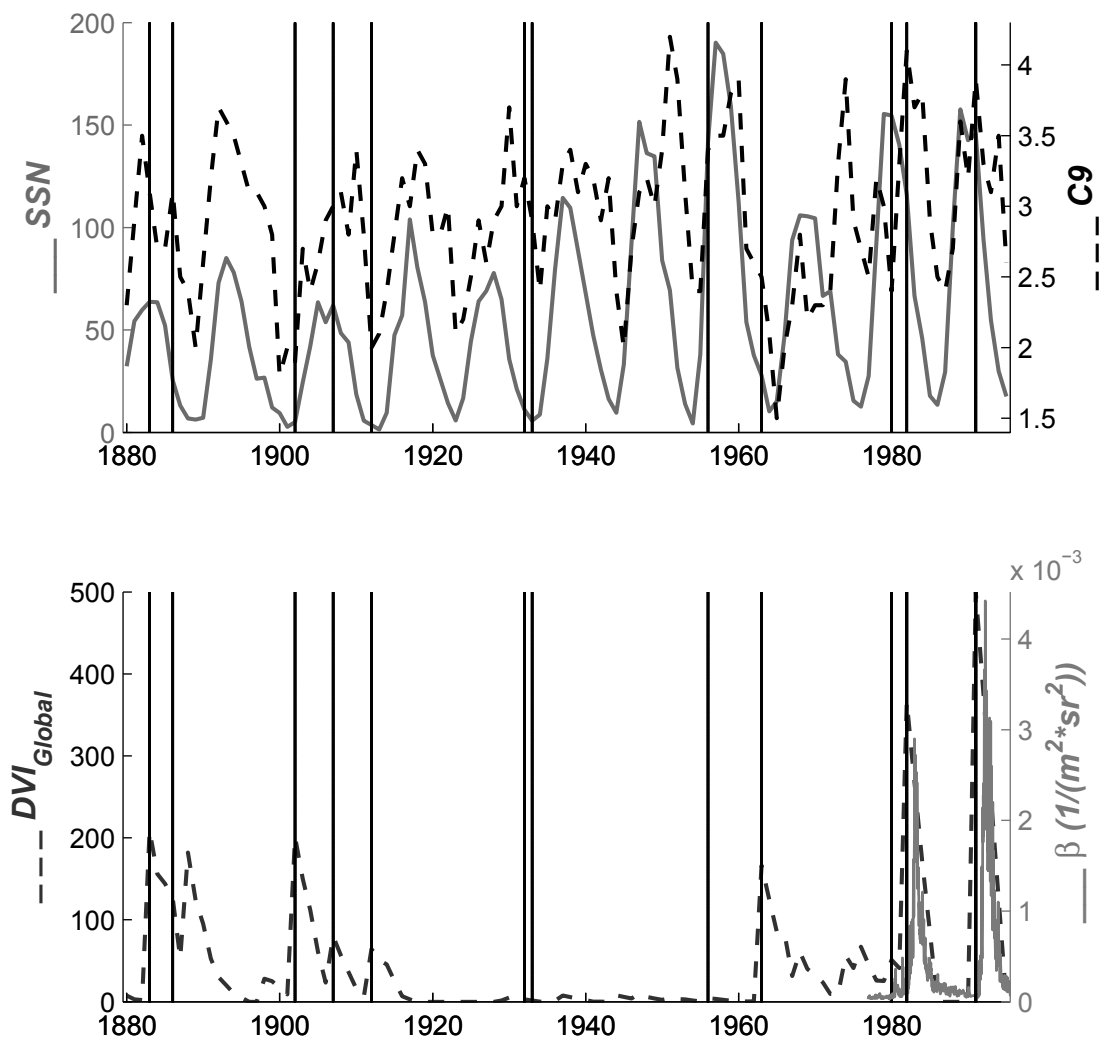


Рис. 4.3: Верхняя панель: графики солнечной ( $SSN$ ) и геомагнитной ( $C9$ ) активности. Нижняя панель: графики климатических последствий вулканической деятельности ( $DVI_{Global}$ ) и вариаций коэффициентов обратного аэрозольного рассеяния (размерность  $\frac{1}{m \cdot sr}$ ) на длине волны  $694.3nm$ . Вертикальными линиями обозначены даты интенсивных ( $VEI \geq 5.0$ ) вулканических извержений (Таблица 4.2).

#### Wavelet coherence and phase of Dust Veil Index & Tau

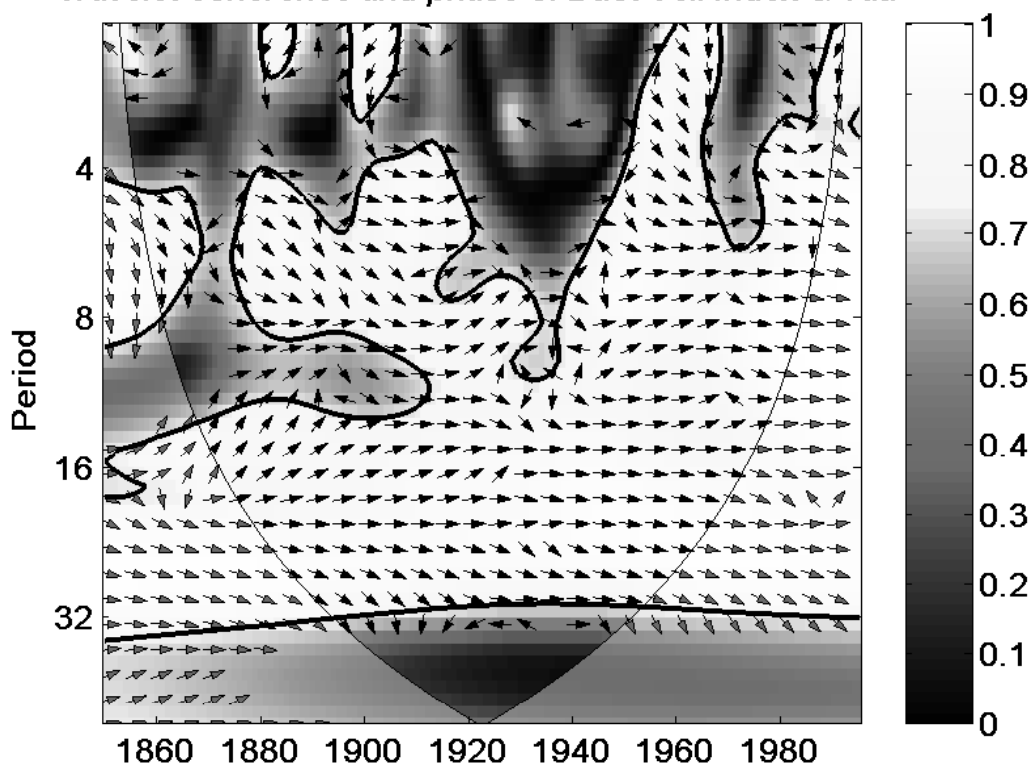


Рис. 4.4: Спектр вейвлет-когерентности индекса  $DVI_{Global}$  – воздействия вулканической активности на климат – и изменений прозрачности атмосферы  $\tau$ . Выделенные зоны превышают порог значимости 95% над уровнем “красного” шума. Направление стрелок слева-направо означает, что ряды находятся в фазе, справа-налево - в противофазе, а вертикально вниз - то, что первый ряд (вулканическая активность) опережает второй (прозрачность атмосферы  $\tau$ ) на четверть периода, вверх - означает соответствующее запаздывание.

<http://data.giss.nasa.gov/modelforce/strataer/>). Как видно из графика, индекс  $DVI_{Global}$  когерентен с изменениями прозрачности атмосферы практически на всём диапазоне частот.

Во второй половине XX-ого века произошли два самых мощных за последние сто лет извержения тропических вулканов Эль-Чичон в Мексике (1982) и Пинатубо на Филиппинах (1991), приведших к сильному изменению оптических свойств атмосферы на всей планете. После этих вулканических извержений количество сульфатных аэрозольных частиц в атмосфере Земли резко возросло, что отразилось не только на изменении прозрачности атмосферы, но и привело к понижению глобальной температуры.

Даты наиболее интенсивных вулканических извержений за интервал времени с 1880г. по 1995г. представлены в Таблице 4.2. Индекс вулканической

Таблица 4.2: Список интенсивных ( $VEI \geq 5.0$ ) вулканических извержений, начиная с извержения вулкана Кракатау в 1883 г.

Название вулкана	Географическое положение	Дата извержения	VEI
Кракатау	Индонезия	27 Августа 1883	6
Окатайна	Новая Зеландия	10 Июня 1886	5
Санта-Мария	Гватемала	24 Октября 1902	6
Ксудач	Камчатка, Пенинсула	28 (?) Марта 1907	5
Новарупта	Аляска, Пенинсула	6 Июня 1912	6
Азул, Церро	Центр. Чили	10 Апреля 1932	5+
Харимкотан	Курильские острова	8 Января 1933	5
Безымянный	Камчатка, Пенинсула	30 Марта 1956	5
Агунг	Индонезия - Острова Лессер-Сунда	17 Марта 1963	5
Сэнт-Хелен	Вашингтон, США	18 Мая 1980	5
Эль-Чичон	Мексика	3 Апреля 1982	5
Пинатубо	Филиппины	15 Июня 1991	6
Гудзон	Южн. Чили	12 Августа 1991	5+

мощности (The volcanic explosively index,  $VEI$ ) характеризует мощность извержения.  $VEI$  варьируется в интервале от 0 до 8. Из списка извержений, взятого с веб-сайта Программы Исследований Глобального Вулканизма (Global Volcanism Program, <http://www.volcano.si.edu/world/>), отобраны наиболее интенсивные события – со значениями  $VEI \geq 5.0$ , – которые и приведены в Таблице 4.2.

В данном Разделе обсуждается воздействие вулканической деятельности на прозрачность атмосферы и глобальную температуру Земли. Отклик климата на вулканическое воздействие можно видеть по поведению нескольких из приведённых на Рис. 4.3 кривых: графика вариаций  $DVI_{Global}$  (нижняя панель Рис. 4.3), вариаций коэффициента обратного аэрозольного рассеяния (нижняя панель Рис. 4.3), а также из временного распределения вертикальных линий, обозначающих на Рис. 4.3 даты интенсивных вулканических извержений ( $VEI \geq 5.0$ , Таблица 4.2).

Можно проследить соответствие между вулканическими извержениями и их климатическими, атмосферными последствиями. Как видно из Рис. 4.3, вулканические извержения Эль-Чичон (1982) и Пинатубо (1991) инициировали существенные изменения в атмосфере не только локального, но и глобального характера. Это может быть видно из соответствующих им пиков глобального индекса  $DVI$  ( $DVI_{Global}$ ) (индекс  $DVI$  в 1982 и 1991 годах достигал 366 и 500, сформировав два ярко выраженных пика на графике  $DVI_{Global}$ ),

а также из соответствующих им пиков кривой вариаций коэффициентов обратного аэрозольного рассеяния на длине волны 694.3 нм (см. этот же Рис.) Эта кривая была получена по измерениям станции Гармиш-Партенкирхен (Германия) [106], но подобные кривые были получены и на других станциях в других странах и на других континентах. Из этого можно заключить, что извержения вулканов Эль-Чичон (1982) и Пинатубо (1991) оказались самыми сильными за всё XX столетие в смысле глобального воздействия на атмосферу.

Можно заметить, что, как видно из сопоставления кривых облачности (Рис. 4.1) и всплесков индекса  $DVI_{Global}$  вследствие извержений вулканов Эль-Чичон (1982) и Пинатубо (1991) (Рис. 4.3), кривая изменений облачности ведёт себя похожим образом не только с кривой вариаций потоков космических лучей, но и с кривой  $DVI_{Global}$  — кривой климатических последствий всплесков вулканической активности (Рис. 4.3, верхняя панель), — а также кривой вариаций коэффициента обратного аэрозольного рассеяния (Рис. 4.3, нижняя панель). Это ставит под сомнение обсуждаемое в работах [236, 149, 150] (4.1.1) предположение о том, что причиной наблюдаемой в облачности последней четверти XX века квази-11-летней цикличности является солнечная активность. По-крайней мере, под вопросом оказывается единственность этого фактора, как причины наблюдаемой периодичности. Более того, как видно из Рис. 4.1, продолжительность цикла, наблюдаемого в облачности, ближе к “вулканическим” 9 годам (временной интервал между извержениями вулканов Эль-Чичон (1982) и Пинатубо (1991)), нежели к “солнечным” 11 годам. Однако, предлагаемый авторами [236, 149, 150] механизм воздействия на облачность, основанный на принципах, описанных в 4.1.1, 4.1.1 и 4.1.2 (а именно, в последнем пункте, касающемся космических лучей), представляется весьма логичным и физически обоснованным, вследствие чего можно предположить, что на облачности сказались оба фактора: как солнечная, так и вулканическая активность. Степень же воздействия солнечной активности, вероятнее всего, значительно меньше нежели вулканической.

Нужно отметить, что не каждое интенсивное вулканическое извержение вызывает сильные, продолжительные, глобальные изменения в атмосфере. Значительные последствия имеют сильные стратосферные извержения. Вулканическая активность в середине XX-ого столетия, например, глобальным образом почти никак не отразилась на атмосфере. Несмотря на наличие в это время достаточно интенсивных вулканических извержений, имевших локальные последствия, отразившиеся на региональных климатических условиях ([1], [205], [206], [207], [210]) (например, вызвавших локальные похолодания)

([208]), глобальные климатические последствия вулканизма в этом интервале времени были практически нулевыми (Рис. 4.3, верхняя панель). А извержения первой половины XX-ого века, напротив, вызвали климатические изменения глобального масштаба, но не такие сильные, как Эль-Чичон (1982) и Пинатубо (1991).

### **Комбинированное воздействие солнечной и вулканической активности на глобальную приземную температуру воздуха.**

В литературе выдвигались предположения о комбинированном воздействии солнечной, вулканической активности и климатических процессов на верхнюю атмосферу Земли. Например, в работе [126] рассматривается возможность численно оценить это воздействие на стратосферный озон за последние десятилетия. Для моделирования химических процессов, радиационного баланса и динамики атмосферы авторами использовалась интерактивная климатическая модель *NCAR*. Для моделирования вулканических и климатических (*QBO*) воздействий на атмосферу Земли использовалась модель *SOCRATES*. В результате авторами было получено, что рассчитанные вариации озона в стратосфере вследствие солнечного воздействия имеют дипольную структуру, согласующуюся с результатами наблюдений, если учитывать как солнечное, так и вулканическое и климатическое воздействие на стратосферу; но монопольную структуру — если учитывать только солнечное воздействие.

Можно проследить соответствие между солнечной активностью, вулканическими извержениями (и их климатическими последствиями) и вариациями аномалий глобальной температуры, рассмотрев все перечисленные выше факторы в совокупности.

Как уже говорилось выше, Рис. 4.3 иллюстрирует поведение солнечной, вулканической и геомагнитной активности за рассматриваемый период времени. Даты интенсивных вулканических извержений ( $VEI \geq 5.0$ , Таблица 4.2) обозначены на Рис. 4.3 вертикальными линиями. Геомагнитная активность обсуждается в следующем Разделе 4.4.3. А в этом Разделе обсуждаются солнечная и вулканическая активность относительно вариаций глобальных значений приземной температуры воздуха.

Как уже частично отмечалось выше, хорошо просматриваются 11-летние вариации солнечной активности (цикл Швабе) (*SSN*), аналогичная периодичность в геомагнитной активности (индекс  $C_9$ ) (верхняя панель) и климатический отклик на вулканическую деятельность (индекс глобального *DVI* и всплеск коэффициентов обратного аэрозольного рассеяния (нижняя па-

нель)), обусловленный мощными извержениями вулканов Эль-Чичон (1982) и Пинатубо (1991) (Раздел 4.4.1).

Солнечная и вулканическая активность - два независимых фактора, однако, одно из наиболее важных (для понимания природы декадной климатической вариации) наблюдений состоит в том, что даты самых мощных извержений, повлекших наиболее заметные климатические последствия, (Эль-Чичон, 1982 и Пинатубо, 1991) случайным образом пришлись на ветви спада двух последовательных 11-летних циклов солнечной активности, следующих сразу за её максимумами в 1979 и 1990 годах, соответственно (извержения Эль-Чичон были спустя два года, а извержения Пинатубо - на второй год после максимума солнечной активности). Следует подчеркнуть, что, кроме того, время между извержениями составило 9 лет, а это близко к солнечной 11-летней периодичности и, тем самым, создало локализованный по времени вулканический цикл, близкий к 11-летнему. Кроме того, следует отметить, что вейвлет-спектр солнечной активности (количество групп солнечных пятен (Рис. 3.1, нижняя панель)) отражает увеличение амплитуды 11-летних вариаций солнечной активности (см. Раздел 1.1) во второй половине XX-ого столетия. Этот факт, в данном случае, хорошо виден и непосредственно на графике вариаций солнечной активности (Рис. 3.1, нижняя панель).

На Рис. 2.3(В), Рис. 2.4(В) и Рис. 2.5 (В) можно видеть, что именно в это время (1980-1990 гг.) обнаруживается четкий пик в вейвлет-спектре вариаций глобальной температуры на частоте, близкой к частоте, соответствующей 11-летнему циклу.

Таким образом, можно предположить, что квази-11-летняя периодичность в климате, наблюдаемая во второй половине XX столетия, сформировалась благодаря случайно возникшему “благоприятному” фазовому соотношению между солнечной и вулканической активностью.

На Рис. 4.5 и Рис. 4.6 приведены результаты вейвлет-когерентного анализа вариаций, соответственно, солнечной и вулканической активности, с аномалиями глобальной температуры.

Из Рис. 4.5 видно, что статистически-значимый уровень когерентности между солнечной активностью и  $\delta T_{Global}$  на частоте, соответствующей квази-11-летней периодичности, наблюдается после 1965–1970 гг. Динамика солнечной активности и динамика вариаций климата, при этом, находятся в фазе. Стоит отметить, что намечавшаяся до 1920-х когерентность между этими же рядами данных на почти той же полосе частот имеет противоположное фазовое соотношение.

Рассмотрим подробнее наблюдающуюся начиная примерно с 1970 годов на



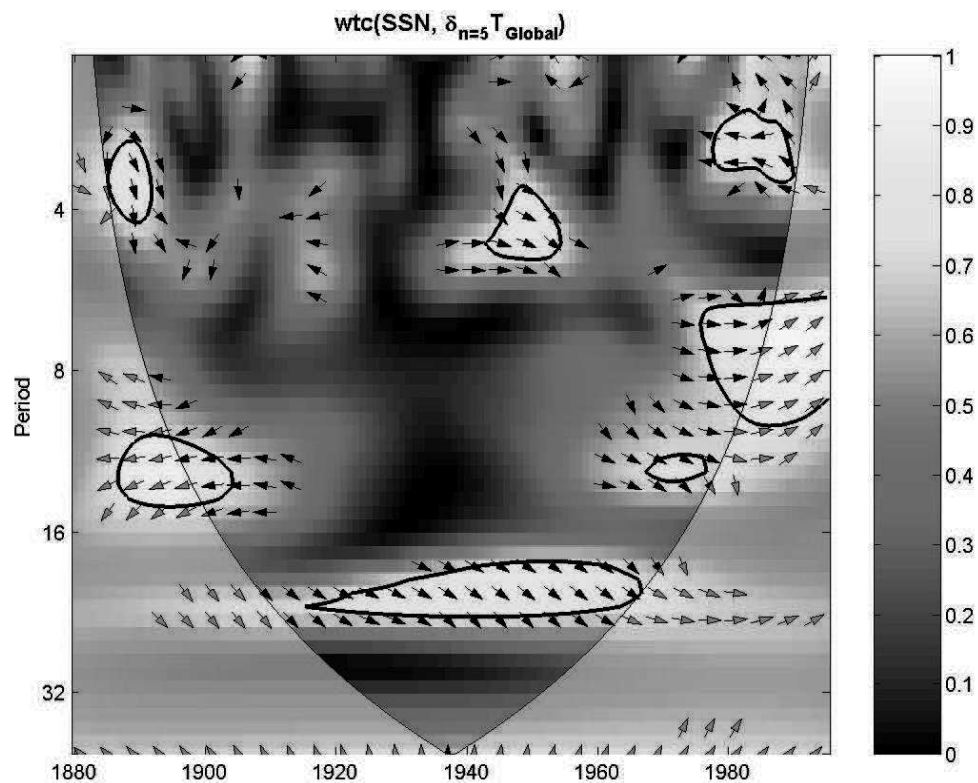


Рис. 4.5: Спектр вейвлет-когерентности солнечной ( $SSN$ ) активности и аномалий приземной глобальной температуры воздуха. Выделенные зоны превышают порог значимости 95% над уровнем “красного шума”. Направление стрелок слева-направо означает, что ряды находятся в фазе, справа-налево — в противофазе, а вертикально вниз — то, что первый ряд (солнечная активность) опережает второй (аномалии приземной глобальной температуры воздуха) на четверть периода, вверх - означает соответствующее запаздывание.

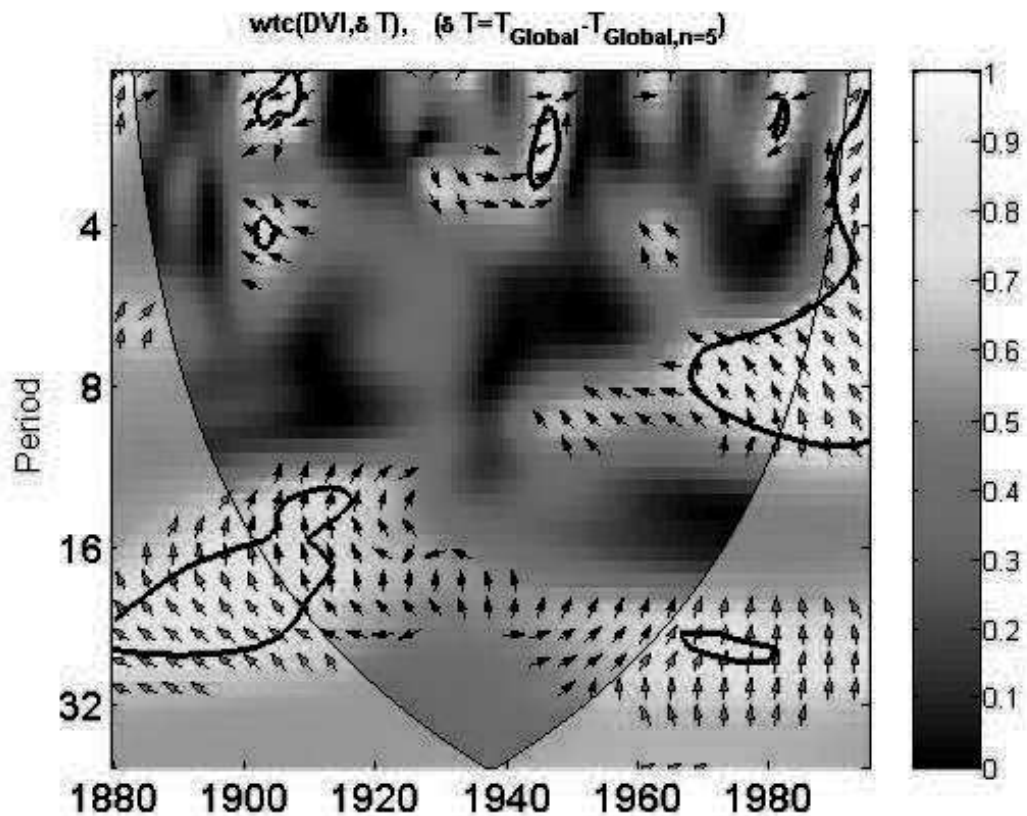


Рис. 4.6: Спектр вейвлет-когерентности вулканической ( $DVI_{Global}$ ) активности и аномалий приземной глобальной температуры воздуха. Выделенные зоны превышают порог значимости 95% над уровнем “красного” шума. Направление стрелок слева-направо означает, что ряды находятся в фазе, справа-налево — в противофазе, а вертикально вниз — то, что первый ряд (вулканическая активность) опережает второй (аномалии приземной глобальной температуры воздуха) на четверть периода, вверх — означает соответствующее запаздывание.

частоте, соответствующей квази-9-11-летней периодичности, когерентность солнечной активности и температурных аномалий, находящихся при этом в фазе (см. Рис. 4.5; напомним, что достоверные результаты — внутри “конуса влияния”). Кроме того, как видно из Рис. 4.6, в тот же самый период времени вулканическая активность на той же или близкой частоте, что и солнечная, когерентна с температурными аномалиями, но с сильным запаздыванием последних по фазе, что видно из направления стрелок после 1970 года. Это означает, что в данном случае реакция глобальной температуры на вулканическое воздействие противоположна по знаку реакции на солнечный сигнал. То есть, из графика следует, что если рост солнечной активности вызывает увеличение глобальной температуры, то рост вулканической — в среднем её понижение. Это согласуется с результатом, представленным в работе [225]. На Рис. 4.7 приведён график (Рис.1 в [225]), из которого видно, что по результатам исследования вулканических извержений 1815, 1875, 1883, 1902, 1947, 1956 и 1963 гг., температура воздуха в Северном Полушарии в среднем понизилась на  $0.2K$  в первый год после извержения.

Заметим, что уровень вулканической активности достаточно высок и в начале XX века. Среди наблюдавшихся тогда извержений вулканов есть и такие, временные интервалы между которыми сформировали “цикл” продолжительностью приблизительно 10 лет (извержения вулканов Санта-Мария (1902) в Гватемале и Новарупта (1912) на Аляске), что близко к 11-летнему циклу Швабе вариаций солнечной активности. С точки зрения продолжительности циклов, сложилась ситуация, “близкая” к ситуации второй половины XX столетия. Однако, декадная (9-11-летняя) вариация проявилась только в одном из исследуемых рядов вариаций глобальной температуры в конце XIX - начале XX столетия, ряде базы данных *NCDC*, поскольку имело место отличное от конца XX столетия “не очень благоприятное” соотношение фаз между солнечной активностью и вулканической деятельностью 4.3: первое извержение совпало со стадией роста солнечной активности, второе извержение пришлось на минимум солнечного 11-летнего цикла, а воздействие на климат от этих извержений было значительно меньше, нежели от извержений Эль-Чичон (1982) и Пинатубо (1991). Точнее, при не очень высоком уровне солнечной активности и “другом” фазовом соотношении, нежели в конце XX века, в вариациях аномалий глобальной температуры наблюдается статистически-незначимый (*NASA-GISS*, *CRU*) и статистически-значимый (*NCDC*) сигнал на периоде в интервале от 10 до 14 лет (смещение в сторону больших периодов — из-за имевших место других извержений). Согласно одному из предположений, выдвинутых в работе [18], ослабление вулканиче-

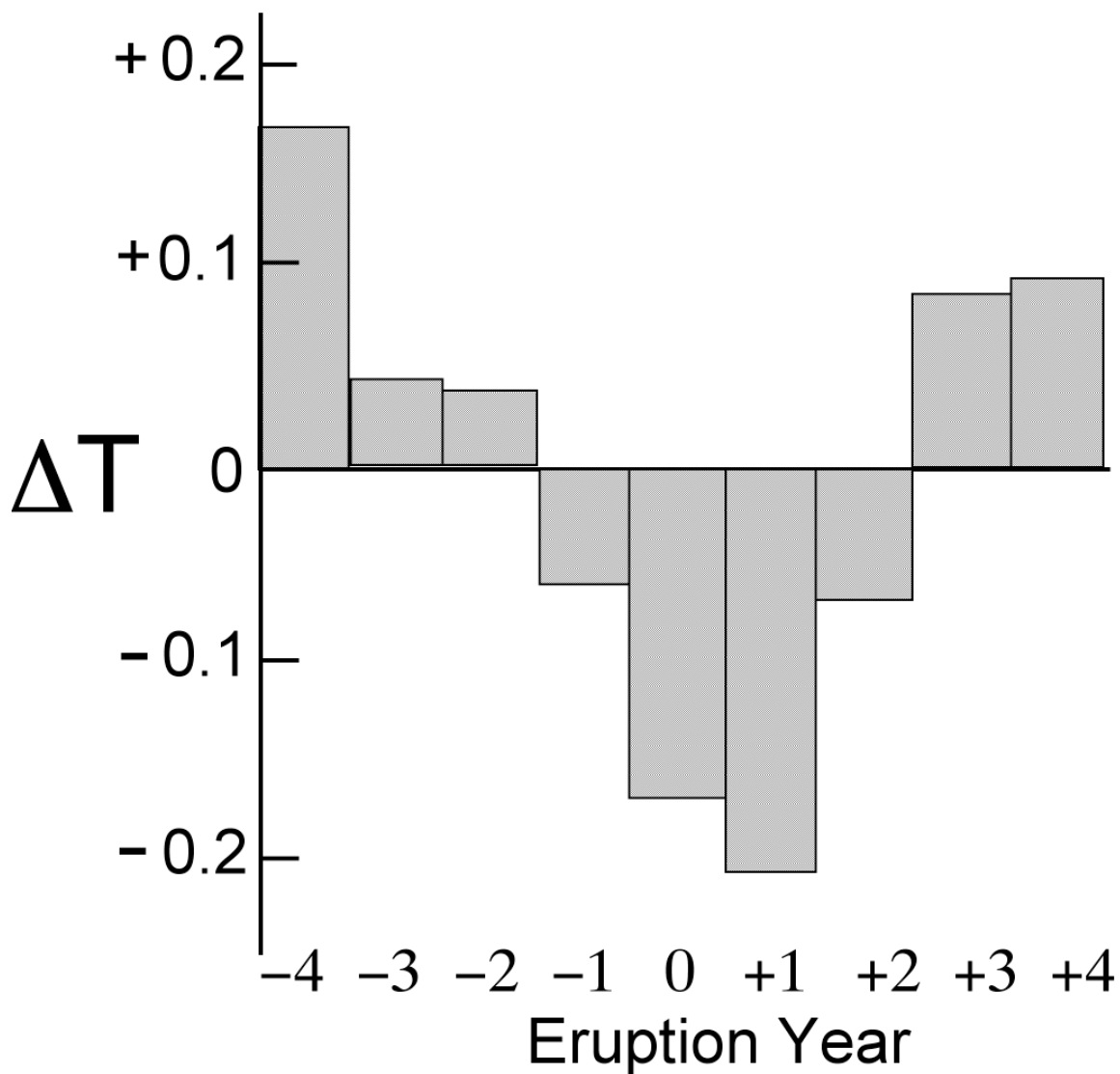


Рис. 4.7: Среднее изменение значений температуры воздуха в Северном Полушарии относительно дат вулканических извержений в 1815, 1875, 1883, 1902, 1947, 1956 и 1963 гг. (Рис.1 в [225]).

ской активности, наблюдаемое в первой половине XX столетия послужило дополнительной причиной усиления роли солнечной активности в потеплении климата в этот период. Однако, наблюдавшуюся в данный период времени вулканическую деятельность нельзя считать слабой, так как имели место события с *VEI* - Volcanic Explosivity Index, - обозначающим интенсивность вулканических выбросов, больше 5, что говорит о достаточно сильных вулканических извержениях, так как *VEI* варьируется от 1 до 8. Для сравнения, извержения вулканов Эль Чичон и Пинатубо имеют *VEI* равный 5. Тем не менее, необходимо заметить, что после 1920 г. практически не было извержений, повлекших глобальные климатические последствия, что видно из графика поведения глобального *DVI* (Рис. 4.3, верхняя панель). Кроме того, как отмечают авторы [1, 205, 206], в начале и середине XX столетия наблюдались локальные похолодания вследствие ряда имевших место интенсивных вулканических извержений. Из вариаций глобального *DVI* (Рис. 4.3, верхняя панель) видно, что эти извержения хоть и имели локальные последствия [1], а в начале XX века оказали на “глобальный” климат средний, даже достаточно сильный эффект, но в середине XX века, как уже отмечалось, глобальный эффект был практически нулевой. Противоречий здесь нет, так как речь идет о локальных [1] и глобальных последствиях вулканической деятельности.

Ещё одним аргументом в пользу того, что имеет место именно комбинированное воздействие солнечной и вулканической активности на климат, а не только солнечное, является то, что в 1940-1960 гг., когда амплитуда 11-летних вариаций солнечной активности была даже больше, чем после 1980 г., в глобальной температуре сигнала на частоте, соответствующей этой периодичности, не наблюдается.

Для иллюстрации комбинированного воздействия солнечной и вулканической активности на климат, была рассчитана линейная регрессия индексов солнечной и вулканической активности по ряду аномалий приземной глобальной температуры воздуха за 1975-1995 гг. На Рис. 4.9(В) приведён спектр вейвлет-когерентности линейной комбинации солнечной и вулканической активности, коэффициенты при которых были рассчитаны методом линейной регрессии, с аномалиями приземной глобальной температуры воздуха.

Говоря о других, нежели обсуждаемое комбинированное воздействие солнечной и вулканической активности, возможных причинах наблюдаемой в глобальной температуре квази-11-летней периодичности, можно выдвинуть следующее предположение. На основании того, что квази-11-летняя периодичность в данных по глобальной температуре наблюдается именно во второй половине XX столетия, когда усиливающийся рост температуры воздуха при-

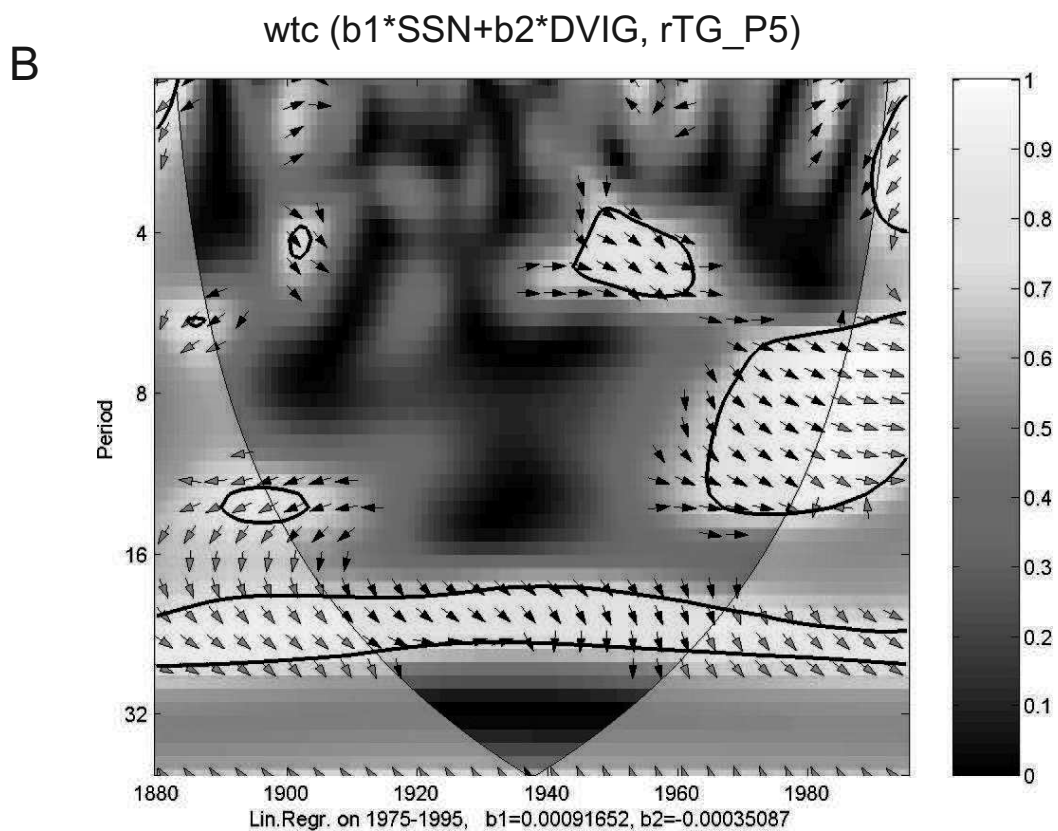
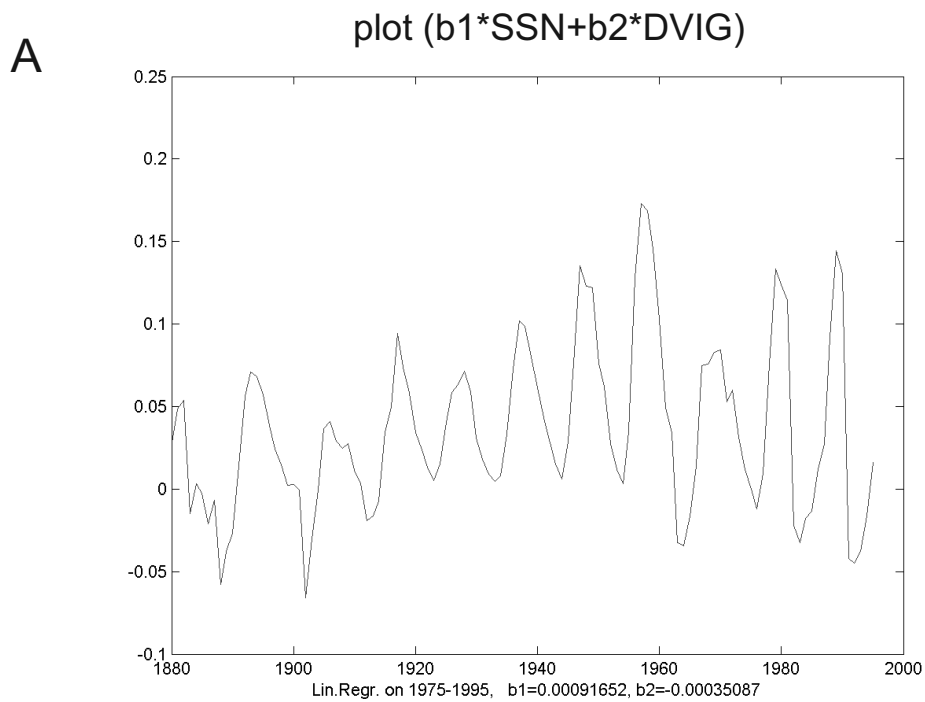


Рис. 4.8: (А) Кривая линейной регрессии солнечной ( $SSN$ ) и вулканической ( $DVI_{Global}$ ) активности по аномалиям глобальной температуры за 1975-1995. (В) Спектр вейвлет-когерентности линейной регрессии с аномалиями глобальной температуры. Порог значимости: 95% над уровнем “красного” шума. Направление стрелок обозначает фазовое соотношение.

нял форму глобального потепления, можно выдвинуть гипотезу, состоящую в том, что резкое глобальное потепление могло послужить неким фоном, в условиях которого солнечный 11-летний сигнал проявился в температурных данных. Этот эффект, по сути, является так называемым стохастическим резонансом, основной смысл которого состоит в том, что достаточно слабый сигнал, незначимый в спокойное время, “проявляется” на фоне достаточно высокого уровня шума. Однако, как бы там ни было, обсуждаемые в данной работе когерентности, наблюдаемые между солнечными, вулканическими и климатическими процессами, существуют. Тот факт, что обсуждаемая декадная периодичность в глобальной температуре второй половины XX столетия наблюдается не чётко на 11-летнем периоде, а в интервале между 9- и 11-летним периодом, говорит о роли вулканической активности, в которой квази 9-летняя периодичность была образована вулканами Эль-Чичон (1982) и Пинатубо (1991). Фазовые соотношения между рассматриваемыми процессами также говорят в пользу того, что внешние по отношению к климату процессы воздействуют на климатическую систему. И наконец, с точки зрения физической обоснованности: воздействие солнечной активности на климат возможно, согласно моделям и предлагаемым физическим механизмам (см., например, [93, 17, 18] и Разделы 4.1.1, 4.1.2), воздействие вулканической активности на климат также физически обоснованно и в ряде аспектов экспериментально показано ([206] и Раздел 4.1.3). Однако, глобальное потепление могло послужить неким “усилителем”, благодаря которому амплитуда квази-11-летнего сигнала в глобальной температуре оказалась выше, чем это было бы в отсутствие такого фактора, как глобальное потепление.

Как было показано выше, в конце XX века имело место комбинированное воздействие солнечной и вулканической активности на климат. Чтобы проверить, сыграло ли роль “усилителя” наблюдаемое в это время глобальное потепление, ответственным за которое наиболее повсеместно считают антропогенный фактор, но не исключён и вклад естественных факторов (см. Раздел 2.1.3), были рассчитаны коэффициенты линейной регрессии для двух случаев разных комбинаций внешних по отношению к климату факторов:

- для солнечной и вулканической активности по аномалиям глобальной приземной температуры воздуха. На Рис. 4.8 приведён спектр вейвлет-когерентности линейной комбинации солнечной и вулканической активности. В качестве коэффициентов при слагаемых – членах линейной комбинации – брались соответствующие коэффициенты линейной регрессии;
- для солнечной, вулканической активности и температурного тренда

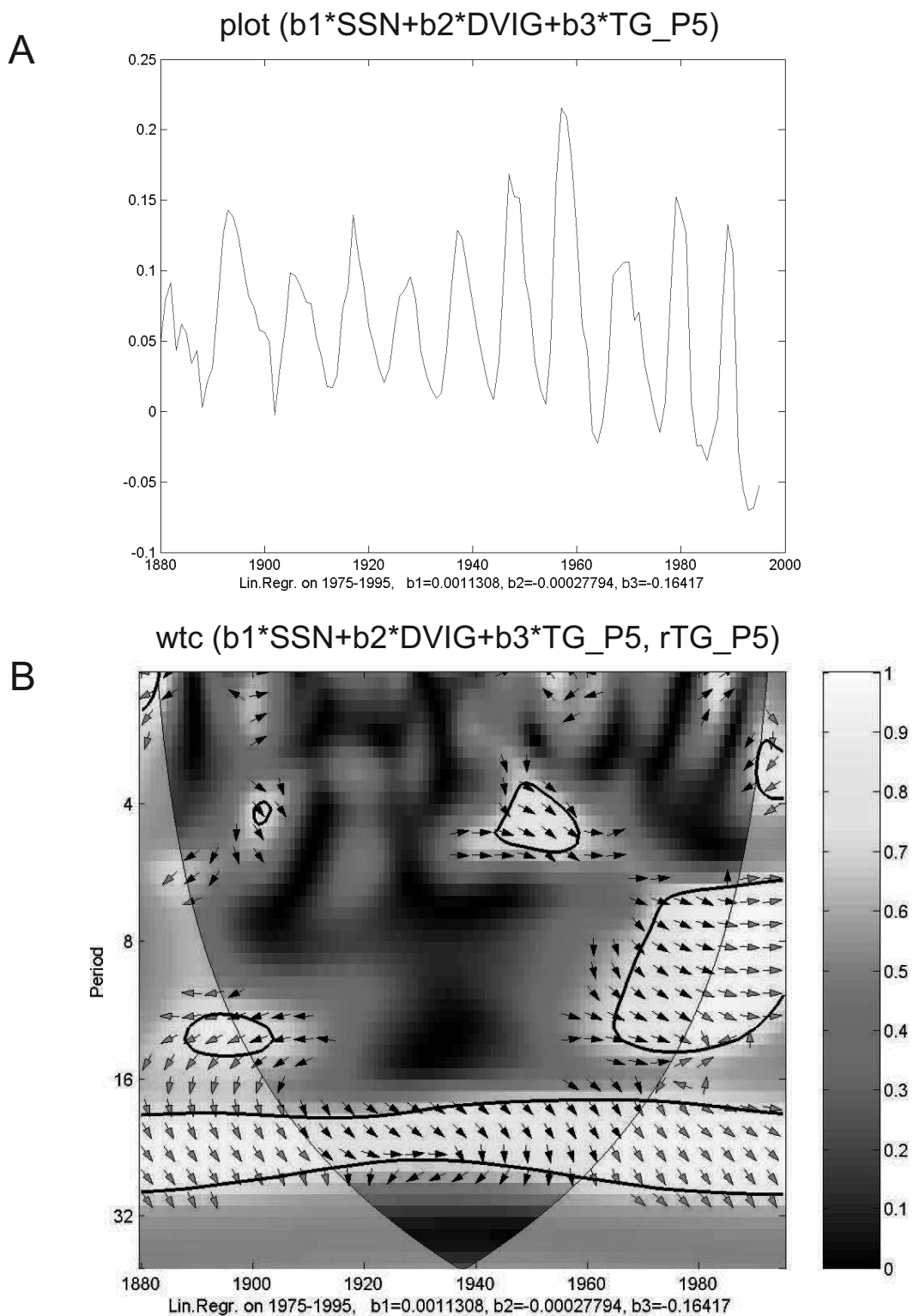


Рис. 4.9: (A) Кривая линейной регрессии солнечной ( $SSN$ ), вулканической ( $DVI_{Global}$ ) активности и температурного тренда во время глобального потепления по аномалиям глобальной температуры за 1975-1995. (B) Спектр вейвлет-когерентности линейной регрессии с аномалиями глобальной температуры. Порог значимости: 95% над уровнем “красного” шума. Направление стрелок обозначает фазовое соотношение.



*глобального потепления по аномалиям глобальной приземной температуры воздуха.* В качестве кривой температурного тренда глобального потепления бралась кривая тренда в температуре, полученная аппроксимацией исходного температурного ряда полиномом 5-й степени. На Рис. 4.9 приведён спектр вейвлет-когерентности линейной комбинации солнечной, вулканической активности и кривой, характеризующей температурный тренд глобального потепления. В качестве коэффициентов при слагаемых – членах линейной комбинации – брались соответствующие коэффициенты линейной регрессии.

Важно отметить, что в обоих случаях коэффициенты линейной регрессии рассчитывались для интервала времени 1975-1995 гг.

Как видно из Рис. 4.8 (В) и Рис. 4.9(В), когерентность ряда линейной регрессии с рядом аномалий глобальной температуры на частоте, соответствующей квази-11-летней периодичности, во второй половине XX столетия в обоих случаях немного сильнее, нежели аналогичная когерентность, наблюдаемая при рассмотрении внешних параметров отдельно, а не в виде ряда, полученного путём применения метода линейной регрессии (Рис. 4.5 и Рис. 4.6). Из сравнения с этими же спектрами вейвлет-кросс-когерентности видно, что в случае рядов линейной регрессии полоса когерентности на периоде 16 лет - 32 года гораздо протяжённее, нежели в случае спектров вейвлет-когерентности отдельно взятых солнечной и вулканической активности с аномалиями глобальной температуры. Однако, поскольку коэффициенты линейной регрессии рассчитывались для интервала времени 1975-1995 гг., а как для вейвлет-спектров солнечной, так и вулканической активности этот интервал времени на периодичности 16 лет - 32 года полностью находится вне “конуса влияния”, то сделать какие-либо выводы относительно когерентности ряда, полученного методом линейной регрессии с рядом аномалий глобальной температуры на частоте, соответствующей 16-32-летней периодичности, не представляется корректным.

Наблюдаемое в спектрах (Рис. 4.8 и Рис. 4.9) фазовое соотношение для когерентности на 11-летней периодичности говорит о том, что ряд линейной регрессии и ряд аномалий глобальной температуры в обоих случаях находятся почти “в фазе”, а точнее, ряд глобальной температуры слегка (приблизительно на 1/8 долю периода) запаздывает относительно ряда линейной регрессии. Это говорит о том, что комбинированное воздействие вариаций внешних факторов влечёт изменения в вариациях глобальной температуры с запаздыванием приблизительно на 1.5 года.

Как видно из сравнения Рис. 4.8 (В) и Рис. 4.9 (В), когерентность на квази-

11-летней периодичности занимает немного более обширную область инфракрасного спектра в случае с учётом тренда глобального потепления. Из чего можно сделать вывод, что усиление сигнала на фоне роста температуры воздуха во время глобального потепления, возможность которого обсуждалась выше, вероятно, имела место, но это усиление было не очень значительным.

Таким образом, применение метода линейной регрессии подтверждает вывод о том, что причиной квази-11-летней периодичности в поведении аномалий глобальной температуры второй половины XX столетия является комбинированное воздействие солнечной и вулканической активности. Температурный тренд во время глобального потепления, вероятнее всего, сыграл роль в усилении 11-летнего сигнала, но это усиление было не очень сильным.

#### **4.4.2 Квази-22-летняя периодичность в когерентности солнечной активности с вариациями глобальной температуры**

В работе [17] отмечается, что корреляция между солнечной активностью и климатом началась значительно раньше второй половины XX века — а именно, в 1920-х годах, и на частоте, соответствующей квази-22-летней периодичности.

Как видно из Рис. 4.5, между 1920 и 1960 в спектре инфракрасного кросс-когерентности между солнечной активностью и глобальной температурой наблюдается устойчивая, статистически-значимая “полоса” когерентности. Этот факт кажется очень интересным, так как именно в этот интервал времени глобальное вулканическое воздействие на климат было практически нулевым: значения глобального  $DVI$  были около нуля (Рис. 3.4 (верхняя панель) и Рис. 4.3 (нижняя панель)).

Можно предположить, что объяснением этого факта как раз и может служить практически нулевой уровень глобального  $DVI$  с 1920 по 1960, то есть отсутствие вулканических извержений, влекущих глобальные климатические изменения. Кроме того, можно предположить, что такого рода когерентность на частоте, соответствующей квази-22-летней периодичности, существует между солнечным и температурным рядами в отсутствие вулканических извержений с сильными глобальными климатическими последствиями.

А принимая во внимание тот факт, что число солнечных пятен коррелирует с количеством солнечной радиации, испускаемой поверхностью Солнца, равно как и с потоками космических лучей, можно выдвинуть три возможных объяснения наблюдаемой когерентности, а также две наиболее вероятные

гипотезы о механизме, стоящем за наблюдаемой когерентностью, — для случая, когда объяснение основано на существовании физического воздействия солнечного фактора на климатический:

- вариации солнечной активности, отражающие вариации полной солнечной радиации, воздействуют на глобальную температуру (с небольшим запаздыванием последней) на частоте, соответствующей квази-22-летней периодичности, в отсутствие других факторов, достаточно сильных, способных “заглушить” когерентность. Примером такого фактора могут послужить глобальные климатические последствия вулканической активности: в середине XX столетия  $DVI_{Global}$  практически равен 0, и когерентность имела место;
- наблюдаемый в солнечной активности магнитный 22-летний цикл Хейла совершенно случайно совпал по частоте с “сидящей” в климатических данных квази-22-летней периодичностью, что, в свою очередь, отразилось в когерентности между этими, совершенно независимыми, процессами. Природа квази-22-летней периодичности остаётся при этом неясной. Она может быть как чисто климатическая, так и вызванная воздействием каких-либо других внешних факторов;
- солнечное воздействие на параметры атмосферы на 22-летней периодичности происходит через посредство вариаций потоков космических лучей. И ответственными за эту периодичность в солнечной активности являются крупномасштабные магнитные поля солнечной короны и гелиосферное магнитное поле.

Здесь встаёт вопрос о том, а какой же именно физический механизм стоит за когерентностью между солнечной активностью и вариациями глобальной приземной температуры воздуха?

Для того, чтобы проанализировать, насколько вероятна каждая из вышеперечисленных гипотез, было проведено дополнительное исследование — исследование когерентностей и фаз между вариациями геомагнитной активности и изменениями глобальной приземной температуры воздуха.

#### 4.4.3 Геомагнитная активность и глобальная температура

На Рис. 4.5 и Рис. 4.10 представлены спектры вейвлет кросс-когерентности и соотношения фаз между солнечной (Рис. 4.5), геомагнитной (Рис. 4.10) активностью и вариациями аномалий глобальной температуры.

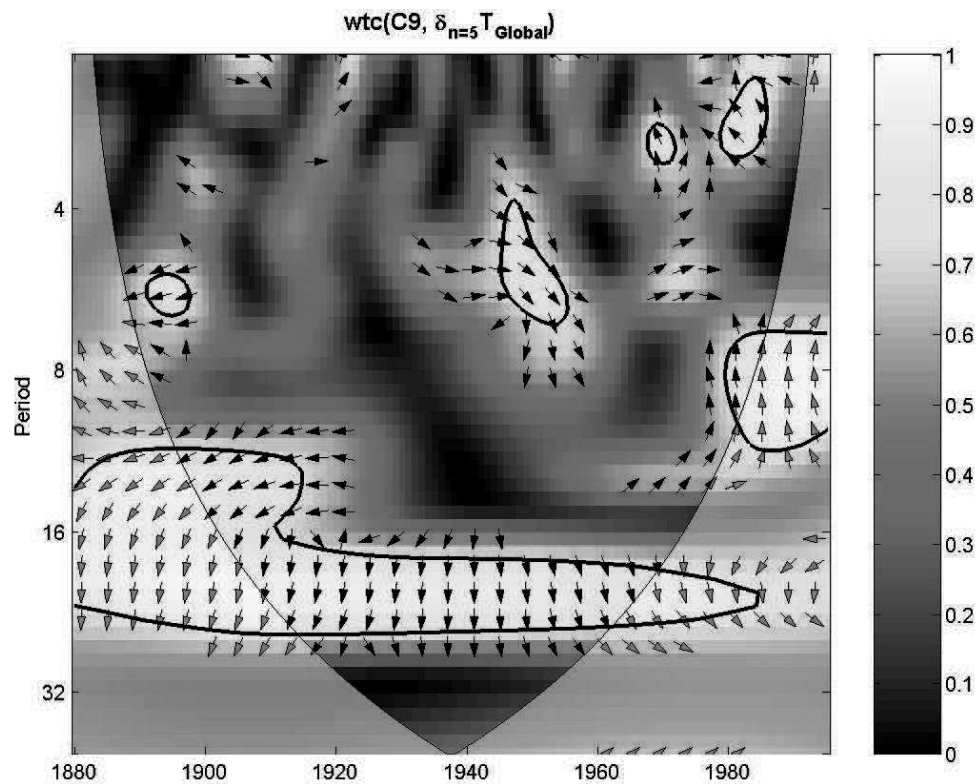


Рис. 4.10: Спектр вейвлет-когерентности геомагнитной (индекс  $g$ ) активности и аномалий глобальной приземной температуры воздуха. Выделенные зоны превышают порог значимости 95% над уровнем “красного” шума. Направление стрелок слева-направо означает, что ряды находятся в фазе, справа-налево — в противофазе, а вертикально вниз — то, что первый ряд (геомагнитная активность) опережает второй (аномалии глобальной приземной температуры воздуха) на четверть периода, вверх — обозначает соответствующее запаздывание.

Статистически-значимый уровень вейвлет-когерентности между геомагнитной активностью и глобальной температурой (Рис. 4.10) на частоте, близкой к частоте, соответствующей 22-летней периодичности, наблюдается почти на всём рассматриваемом интервале времени – до 1980 года. Сделать какие-либо выводы о наличии или отсутствии таковой когерентности после 1980г. не представляется корректным ввиду того, что время после 1980 г. оказывается вне “конуса влияния”.

Таким образом, Рис. 4.5 и Рис. 4.10 иллюстрируют, что когерентность на 22-летней периодичности гораздо устойчивее в случае геомагнитной активности, нежели солнечной активности. Учитывая это, можно предположить, что если когерентность, наблюдаемая между солнечной активностью и вариациями глобальной температуры (Рис. 4.5) является реальной связью, а не обусловлена наличием в рассматриваемых рядах сигналов на близких частотах, не связанных между собой, то на приземную температуру на частоте, соответствующей 22-летней периодичности, воздействуют вариации крупномасштабных магнитных полей солнечной короны.

## 4.5 Выводы к Главе 4

Ниже приведено краткое резюме **результатов**, полученных в Главе 4:

- квази-11-летняя периодичность, наблюдаемая во второй половине XX столетия в вариациях глобальной температуры, вызвана комбинированным воздействием солнечной и вулканической активности: два интенсивных извержения, произошедшие с интервалом в 9 лет, пришлись на фазы спада двух идущих подряд 11-летних циклов солнечной активности, что сформировало искусственный цикл в температуре (небольшое увеличение температуры вследствие роста солнечной активности сменилось уменьшением температуры вследствие роста вулканической); амплитуда этого цикла оказалась большей, чем если бы имело место только солнечное воздействие, либо только вулканическое — по причине чего цикл отразился на статистически-значимом уровне в вейвлет-спектре вариаций глобальной температуры;
- в начале XX столетия в вейвлет-спектре вариаций глобальной температуры наблюдается статистически-незначимый сигнал на периодичности 12-16 лет. Это может быть также связано с комбинированным эффектом солнечной и вулканической активности, но в этом случае вулканические

извержения прились не на спады солнечной активности, образовавшийся “искусственный” цикл получился более длиннопериодный. Извержения были не такими интенсивными, а уровень солнечной активности — не таким высоким, как в конце XX столетия, поэтому сигнал в температурных данных конца XX века — гораздо интенсивнее сигнала в начале XX века;

- статистически-значимая вейвлет-кросс-когерентность между вариациями геомагнитной активности и аномалиями вариаций глобальной температуры на частоте, соответствующей квази-22-летней периодичности, наблюдается на всём исследуемом промежутке времени (с 1880 по 1995 гг.). Вероятно, что вариации крупномасштабных солнечных магнитных полей воздействуют на вариации глобальной температуры воздуха на частоте, соответствующей 22-летней периодичности;
- в интервале времени с 1920 по 1960 гг. наблюдается вейвлет-кросс-когерентность вариаций солнечной активности с аномалиями вариаций глобальной температуры на частоте, соответствующей квази-22-летней периодичности. Эта когерентность наблюдается именно в интервал времени, когда глобальные климатические последствия вулканических изменений практически равны нулю. Это может объясняться тем, что в это время в спектре вейвлет-кросс-когерентности не наблюдается гораздо более интенсивных, ярко-выраженных вариаций с большей амплитудой, как это случилось, например, в конце XX столетия на частоте, соответствующей квази-11-летней периодичности вследствие комбинированного эффекта солнечной и вулканической активности. Таким образом, вероятно, что вейвлет-кросс когерентность солнечной активности и аномалий вариаций глобальной температуры на частоте, соответствующей 22-летней периодичности, существует тогда, когда нет более сильных цикличностей и когерентностей, доминирующих над обсуждаемой;
- предположительно, за наблюдаемую когерентность солнечной активности и вариаций глобальной температуры на квази-11-летней периодичности ответственны мелкомасштабные магнитные поля солнечных пятен, а на квази-22-летней периодичности — крупномасштабные магнитные поля солнечной короны.

Из полученных в Главе 4 результатов можно сделать следующие

**ВЫВОДЫ:**

- солнечная и вулканическая активность оказывают комбинированное воздействие на климат Земли, причём случайный вулканический фактор усиливает или ослабляет воздействие периодического 11-летнего солнечного в зависимости от их фазового соотношения;
- когерентность солнечной активности и глобальной приземной температуры воздуха на 22-летней периодичности наблюдается в отсутствие более интенсивного фактора — в отсутствие вулканических извержений с ненулевыми климатическими последствиями;
- отклик климата на вариации геомагнитной активности на 22-летней периодичности интенсивнее, чем на вариации солнечной активности на 22-летней периодичности.

## Глава 5

# Географическое распределение регионов, где наблюдаются периодичности. Чувствительность к внешним воздействиям различных климатических зон. Группы регионов со сходным поведением

В предыдущей Главе обсуждалось воздействие солнечного и вулканического факторов на глобальную приземную температуру Земли. Однако, совершенно логично возникает вопрос: а сказываются ли вариации обсуждаемых выше внешних параметров на климате во всех географических регионах планеты или же только в большинстве из них, что могло оказаться достаточным для того, что в вариациях аномалий глобальной температуры в конце XX столетия наблюдается статистически-значимая квази-11-летняя периодичность в вейвлет-спектре (Рис. 2.3 (В), Рис. 2.4 (В), Рис. 2.5 (В)). Кроме того, представляется очень интересным проследить эволюцию отклика на внешние воздействия приповерхностной температуры воздуха над сушей и температуры приповерхностных вод океана.

Итак, в данной Главе представлены результаты исследования географического распределения наличия цикличностей и откликов на внешние воздействия в температуре. В результате анализа сети метеорологических станций были выявлены станции, в данных которых наблюдаются отклик на внешние воздействия на декадных периодичностях. Произведена попытка выявить группы климатических зон со сходным поведением в контексте наличия цикличностей и характера отклика на влияние изменений в поведении внешних параметров.



## 5.1 Введение к Главе 5

Существуют работы, в которых обсуждается вопрос о воздействии внешних факторов на климат Земли по регионам. Но в такой постановке задачи, как описано в начале этой Главы, исследования практически не проводились. Основные особенности исследования региональных откликов климата на внешние параметры, приводимого в данной работе, состоят в следующем:

- ввиду того, что воздействие на климатическую систему является нелинейным и нестационарным, как было показано на примере аномалий глобальной приземной температуры воздуха, в этой части исследования также используются локально-нелинейные методы, в особенности: анализ вейвлет-кросс-когерентности двух рядов (Раздел 1.1);
- исследуются нестационарность и нелинейность наблюдающихся между внешними и климатическими (температурными) вариациями когерентностей как пространственная, так и временная;
- данное исследование проводится в рамках гипотезы о комбинированном воздействии на климат Земли солнечной и вулканической активности;

Даже если рассматривать “в общем” работы, где затрагивается вопрос поиска климатических зон, где есть отклик на солнечную активность, немного, а результаты, которые там получены, чаще всего проясняют лишь отдельные аспекты проблемы — аспекты, которых касалась поставленная задача. Причём чаще всего исследования проводятся либо на основании экспериментальных данных с использованием линейных методов, либо на основании модельных оценок. К тому же, не все работы связаны с исследованиями параметров именно нижней атмосферы. Ниже перечислены некоторые из результатов, имеющих отношение к исследованию наличия периодичностей в разных регионах планеты и отклика на вариации солнечной активности. Что касается воздействия на климат вулканической активности, то оно является более исследованным по сравнению с солнечным. Однако, наибольшее количество результатов получено в области исследования краткосрочных последствий вулканических извержений. Что касается долгосрочных последствий, в том числе декадных, то ответ на этот вопрос по сей день остаётся не очень ясным [206]. Распространение последствий вулканических извержений вследствие атмосферной циркуляции в зависимости от разных типов вулканов и их местоположения подробно рассматривается в Разделе 4.1.3.

В работе [28] на основании результатов исследования, реализованного на базе климатической модели *NCAR*, было установлено, что в 850–1949 гг., климатической зоной, наиболее чувствительной к вариациям солнечной активности, является регион высоких широт Северного полушария, в особенности — Аляска и севернее.

Исследование [43] посвящено роли солнечной активности в вариациях климата только одного региона, региона Северной Атлантики на протяжении Голоцена. Исследование проводилось по реконструированным данным солнечной активности (изотопы  $Be^{10}$  и  $C^{14}$ ), и реконструированным данным по глубоководным Северо-Атлантическим течениям (глубоководные отложения). Авторами не только было установлено, что влияние вариаций солнечной активности на климат Северной Атлантики имело место в течение всего Голоцена, но, что особенно интересно в аспекте задач данной Главы, обсуждается механизм усиления солнечного сигнала и его переноса в разные области планеты (“глобального переноса”), благодаря особенностям гидрографии поверхности Северной Атлантики и глубинных Северо-Атлантических вод.

Работа [49] посвящена поиску наиболее чувствительных к воздействию солнечной активности зон. Исследование проводится на основе изучения разности между приземной температурой воздуха в годы максимумов солнечной активности и приземной температуры воздуха в годы минимумов солнечной активности. Авторами было установлено, что наибольшая разница наблюдается в высоких широтах обоих полушарий, причём немного бóльшая — в Северном полушарии. Минимальная разница наблюдается в диапазоне широт от  $0^\circ$  до  $-45^\circ$  (низкие широты Южного полушария).

Результаты исследования [245] показали, что декадные (квази-10-11-летние) вариации в температуре наблюдаются наиболее явно в Северной Америке.

Работа [264] посвящена другого рода исследованию — исследованию различного отклика облачности на солнечное воздействие и поиску агентов, ответственных за наличие воздействия солнечной активности на облачность. В частности, было установлено, что на формировании низких облаков над океанами и засушливыми зонами континентов больше сказывается излучение в  $УФ$ -диапазоне, а в средних и высоких широтах над океанами и над влажными землями с высокой концентрацией аэрозолей в атмосфере над ними — интенсивность потоков космических лучей; на формировании же высоких облаков над океанами и влажными континентами больше сказывается интенсивность потоков космических лучей. Эта работа может иметь значение не только с точки зрения обнаружения закономерностей, входящего в задачи данной Главы, но и с точки зрения физических механизмов, отвечающих за

наблюдаемые отклики приземной температуры и их распределение.

### 5.1.1 Географические зоны, в которых климатические изменения выражены наиболее ярко

Работа [51] посвящена исследованию степени variability региональных климатов в 1766-2000 вследствие различных климатических процессов. Доминирующими выделены весенние, зимние и осенние *Северо-Атлантические Осцилляции (NAO)* с наблюдающимся трендом на протяжении последних 40 лет зимой и весной; а также положительный тренд, отражающий возрастающее влияние области высокого давления, расположенной в районе Азорских островов (*Azores High*), на Центральную Европу и Средиземноморье, совпадающее с тёплыми и засушливыми условиями. Обсуждается вопрос о природе этих трендов: внутриклиматическая или же являющаяся результатом изменения радиационного баланса под воздействием природных факторов (солнечного и вулканического) и антропогенного. Исследование [51] не показало влияния вулканических извержений на *NAO* через 1-2 года после извержения (как отмечалось в некоторых предыдущих работах, например, в [76, 271], и обсуждается теоретически в работе [206]), однако показало значение воздействия антропогенного фактора на климат Европы в XX столетии.

Как уже обсуждались в Разделе 2.1.2, цикличности в климате являются предметом целого направления исследований.

В работе [89] проведена классификация климатических зон по степени изменчивости климата в них. Исследование проводилось на основании 20 климатических моделей по трём сценариям. Результат Рис. 1 в работе [89]) приведён на Рис. 5.1. Можно отметить, что наиболее вариабельны более северные зоны — особенно Северная Атлантика, — а также Средиземноморье.

Исследование [249] посвящено оценкам влияния солнечной активности на климат в разные фазы солнечного цикла. Выделены географические зоны, наиболее чувствительные к минимумам или максимумам солнечной активности.

### 5.1.2 Приповерхностная температура воздуха и 11-летний солнечный цикл Швабе

В пользу того, что внешнее воздействие на климат имеет-таки место, говорит работа [49], авторы которой установили, что за рассмотренный ими интервал времени (вторая половина XX столетия, эпоха глобального потепления) в годы высокой солнечной активности в 11-летних циклах приземная температу-

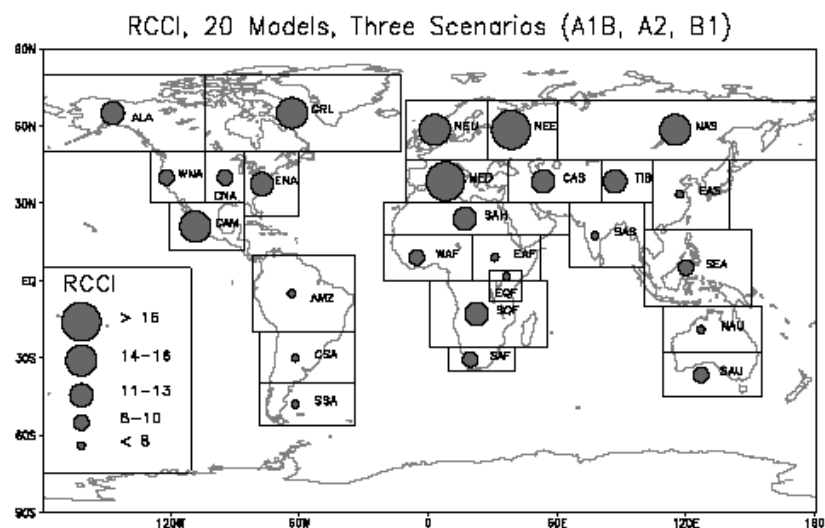


Рис. 5.1: Распределение климатических зон по степени вариальности, выраженности климатических изменений (climate change hot-spots) (Рис. 1 в [89]). Значения индекса *RCCI* (*Regional Climate Change Index*) приведены для 26 климатических зон. Расчёт производился на основании 20 климатических моделей AOGCMs (BCCR-BCM2-0, CCSM3-T47, CNRM-CM3, CSIRO-MK3, GFDL-CM2-0, GFDL-CM2-1, GISS-AOM, GISS-EH, GISS-ER, IAP-FGOALS, INMCM3, IPSL-CM4, MIROC3-2H, MIROC3-2M, MIUB-ECHO-G, MPI-ECHAM5, MRI-CGCM2, NCAR-CCSM3, NCAR-PCM1, UKMO-HADCM3) по трём “сценариям” эмиссий  $CO_2$ , рассчитанным *IPCC* (A1B, A2, B1) [89].

ра воздуха на  $0.2\text{K}$  выше, чем в годы низкой солнечной активности. Авторами также была проанализирована разность температур в годы максимумов и в годы минимумов в контексте географического распределения наиболее “чувствительных” к 11-летним вариациям солнечной активности зон. В результате было установлено, что наиболее “чувствительные” зоны находятся в высоких широтах.

На Рис. 5.2 приведено географическое распределение значений разности приповерхностных температур (база данных *NCEP*) за 1959-2004 гг. в годы максимумов и в годы минимумов солнечной активности. Хорошо видно, что в высоких широтах обоих полушарий значения исследуемой разности значительно больше, чем в средних или низких широтах. Однако, несколько регионов достаточно больших значений разности температур наблюдаются и в средних/низких широтах. Как видно из Рис. 5.2, эти регионы находятся в районе Крыма, в области Красного моря, в Западной Африке, к Северу от полуострова Индостан и к востоку от Японии.

Таким образом, работа [49] и Рис. 5.2 являются очень весомым аргументом в пользу того, что солнечная активность играет роль в вариациях приземной температуры Земли, который также показывает, что отклик климата на солнечный сигнал не одинаков в разных географических зонах планеты. Однако, приведённое географическое распределение говорит о том, что имеет место такой эффект, но и требует более детального его исследования.

## 5.2 Экспериментальные данные

Для осуществления этой части работы были использованы данные *HadCRUT3v* по вариациям приземной температуры воздуха и приповерхностных вод океана из базы данных Университета Восточной Англии (Climatic Research Unit, School of Environmental Sciences, University of East Anglia, <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>). Выбор именно этой базы данных для исследования временного и географического распределения наличия периодичностей в климате и откликов климатической системы на внешние процессы обосновывается в основном “техническими” причинами, перечисленными ниже. Для такого рода исследования необходима база данных метеорологических станций, сеть которых удовлетворяет следующим критериям:

- во-первых, сеть метеорологических станций должна покрывать земной шар как можно более “густо” не только в наиболее “обжитых” и густона-

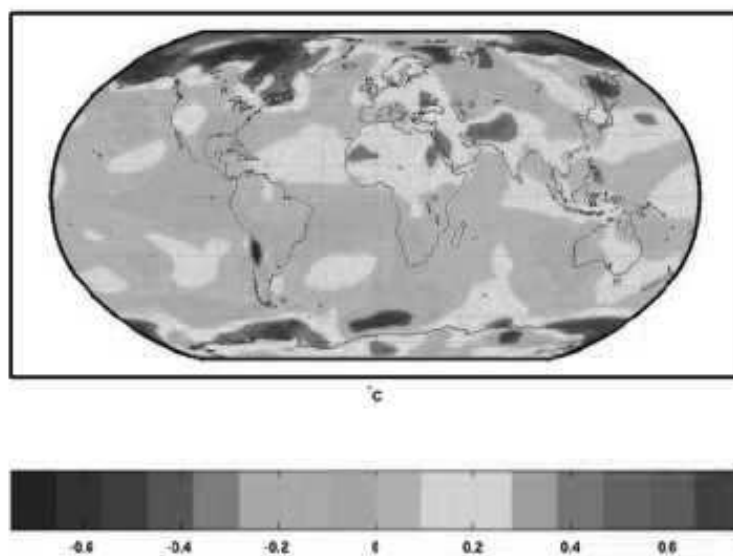


Рис. 5.2: Глобальное приповерхностное распределение значений разности температур в годы максимумов солнечной активности и в годы минимумов (Рис. 3 в работе [49]). Разрешение данных  $5^\circ \times 5^\circ$ . Тест методом “Монте-Карло” показал статистическую значимость выше 95% для приведённого глобального распределения [49].

селённых местах, но и в достаточно удалённых и малозаселённых областях;

- во-вторых, данные этих станций должны покрывать как можно бóльший интервал времени: желательно, не менее 100 лет, чтобы была возможность исследовать не только роль внешних воздействий в региональных климатах в эпоху особо интенсивного глобального потепления, наблюдаемого во второй половине XX столетия, но и в гораздо более раннюю эпоху;
- конечно же, очень важно качество данных. База климатических данных *CRU* оказалась наиболее подходящей по всем критериям.

База температурных данных *HadCRUT3v* представляет собой набор данных, пересчитанных для “сетки” с разрешением  $5^\circ \times 5^\circ$ . Для некоторых станций записи начинаются с 1851 г., для некоторых — позже. В случае окончания записей — аналогично. В результате общая база состоит из рядов разной длины, так как для разных станций ряды данных имеют разную длину. Чтобы выбрать более или менее однородную сеть данных, была произведена предварительная обработка. Данные выбирались следующим образом. Поскольку для описываемого исследования желательна сеть станций с как можно лучшим разрешением, но, в то же время, достаточно хорошего качества, то станции выбирались по нескольким критериям (см. Раздел 5.3):

- количество “реальных” данных должно быть не менее 85% (то есть, не более 15% пропусков); пропуски были заполнены методом линейной интерполяции (см. Раздел 5.3);
- среди полученного набора рядов были выбраны те, записи которых покрывают интервал времени с 1910 по 1988 гг. Фактически, почти все ряды (кроме двух) с записями по 1988г. имеют записи до 1999—2007г. (см. Раздел 5.3).

Таким образом были выбраны ряды, по которым проводилось исследование географического распределения наличия в климате периодичностей и отклика климатической системы на внешние воздействия. Будем условно называть их “станциями”, несмотря на то, что фактически это “узлы” сетки. На Рис. 5.3 приведена географическая карта, на которой отмечены выбранные для исследования — в соответствии с вышеперечисленными критериями — метеорологические станции. Как видно из приведённой географической карты, сеть станций, удовлетворяющая вышеперечисленным критериям выбора,

HadCRUT3v; Criteria: 85% of real data; from 1910 year; till 1988 year;

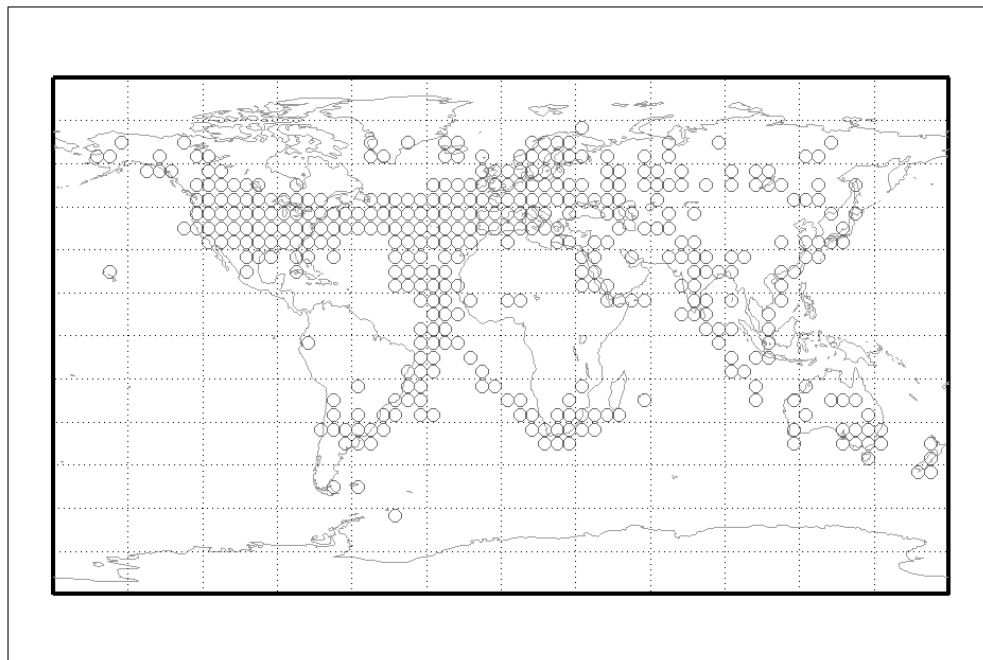


Рис. 5.3: Сеть метеорологических станций, выбранных для исследования, обозначенных на географической карте.

к сожалению, не очень однородная. Но, тем не менее, эта сеть покрывает большую часть поверхности земного шара. Ещё один недостаток состоит в том, что, к сожалению, нет станций, расположенных в околополярных регионах.

Стоит отметить, что данная работы была проведена также для другой базы данных приповерхностных температур воздуха — базы данных Колумбийского Университета (<http://www.columbia.edu>). Однако, выбранные станции этой сети гораздо более неравномерно распределены и практически не затрагивают удалённых от “цивилизации” регионов. Забегая вперёд, можно тем не менее отметить, что в той части планеты, где данные имеются, результаты схожи с полученными для базы *CRU*.



### 5.3 Методология

Ввиду того, что данная Глава посвящена исследованию, в целом повторяющему описанное в Главе 2 и Главе 4 для случая глобальной температуры. Основное отличие состоит в том, что в предлагаемой Главе рассматриваются вариации температуры воздуха отдельно на каждой из выбранных метеорологических станций, после чего полученные результаты рассматриваются все вместе. Делается это для изучения географического распределения наличия периодичностей в температурных рядах и климатических зон, в которых наблюдается отклик приземной температуры воздуха на вариации внешних параметров.

Для исследования наличия периодичностей на рассматриваемых частотах, был использован вейвлет-анализ (Раздел 1.1).

Для того, чтобы выявить (если таковое имеется) географическое распределение метеорологических станций, в данных которых наблюдается отклик на внешние (солнечное и вулканическое) воздействия, были изучены когерентности и фазовые соотношения рядов вариаций приземной температуры воздуха и рядов вариаций внешних параметров, для чего применялся анализ вейвлет-кросс-когерентности (Раздел 1.1).

Технически эта часть исследования реализовывалась следующим образом. В пакете “MATLAB” было написано программное обеспечение, позволяющее работать с предварительно подготовленными (переведёнными в определённый формат представления данных) базами климатических данных. Далее — для создания более полного представления об особенностях получения и визуализации результатов — приведено краткое описание программного обеспечения.

**Предварительная обработка баз климатических данных** очень важна и играет далеко не последнюю роль в работе программного обеспечения. Здесь можно выделить три основных момента:

1. *перезапись содержащихся в базе данных значений* в соответствии с форматом, предусмотренным программным обеспечением, разработанным автором данной диссертации. Обработка каждой конкретной базы зависит от формата, в котором она представлена Центром Данных, представившим её, и различна для каждой из используемых баз;
2. *оценка качества содержащихся в базе данных записей*. А именно, фильтрация имеющихся станций с оценкой длины (с какого по какой год имеются данные) и качества записей (какой процент этих записей — реаль-

ные данные, а не пропуски). Результатом процесса анализа качества базы данных является файл, содержащий информацию о данных каждой станции. Часты ситуации, когда станция, названная в базе, может не содержать записей вообще. Тогда она не включается в файл, содержащий информацию о базе;

3. *создание для данных каждой станции отдельного файла.* Это делается для удобства работы с большими массивами данных — гораздо эффективнее с точки зрения затрат машинных/программных ресурсов.

**Первым этапом работы обсуждаемого программного обеспечения** является анализ записей в исследуемой климатической базе данных и выбор станций для исследования по одному или нескольким критериям. Задаются параметры, касающиеся выбора данных для исследования, пользователем, сразу после запуска программы, которая предлагает варианты критериев и запрашивает их значения. Выборка может производиться по качеству данных (выбираются станции, количество реальных данных, не пропусков, в записях которых превышает заданный процент), и/или по задаваемым временным интервалам (выбираются только те станции, записи которых начинаются не позднее какой-либо даты и/или заканчиваются не ранее какой-либо даты), и/или по задаваемым географическим зонам (выбираются станции, содержащиеся в регионе, ограниченном заданными широтами и долготами). Выбор можно производить по одному или нескольким критериям. После каждого выбора строится географическая карта с отмеченными на ней метеорологическими станциями, удовлетворяющими условиям запроса. Далее можно остановиться на таком результате выбора или же продолжить выбор с использованием других критериев. Файлы с данными выбранных станций записываются в отдельную папку вместе с информационным файлом и географической картой сети выбранных станций. Такая “перезапись” в отдельную папку удобна, так как при дальнейшей работе с такими же критериями выбора станций, можно сразу обращаться к уже созданному каталогу.

**Второй этап** посвящён интерполяции имеющихся в данных пропусков. В качестве метода была выбрана линейная интерполяция. Почему именно линейная — ввиду специфики задачи и исследуемых данных: применение любого другого, нелинейного, способа интерполяции может изменить ряд таким образом, что возникает опасность возникновения артефактов в виде несуществующих в реальности периодичностей. И, с другой стороны, очень маловероятно, что линейная интерполяция может повлечь такой эффект. Возможность же противоположного эффекта, “пропажи” из спектра реально суще-

ствующей периодичности — что тоже искажает результат, — в случае линейной интерполяции также очень мала, в отличие от нелинейной интерполяции, когда искусственно добавленный цикл может “исказить” реально существующий. В случае линейной интерполяции это маловероятно ещё и по той причине, что при отборе данных по качеству, как правило выбираются станции с относительно небольшим количеством пропусков. Если же понизить порог качества для выбираемых данных, то есть, выбрать данные с бóльшим количеством пропусков, то, естественно, к получаемым по такой выборке результатам нужно относиться с очень большой долей скепсиса. Результаты интерполяций также записываются в папку с файлами, выбранными в ходе первого этапа.

**Третий этап** состоит в расчёте вейвлет-спектров и спектров вейвлет-кросс-когерентности и фаз с исследуемыми внешними факторами. Этот расчёт производится для каждой станции из сети метеорологических станций рассматриваемой базы данных. Результаты, как и в предыдущих двух этапах, записываются в ту же папку с файлами по выбранным станциям.

**Четвёртый этап** — визуализация результатов. Для каждого года строилась географическая карта с нанесёнными на неё метеорологическими станциями, обозначенными окружностями. Если в данный год для данной станции наблюдается сигнал в вейвлет-спектре или в спектре вейвлет-кросс-когерентности (смотря что исследуется) на статистически-значимом уровне, то окружность закрашивается цветом, согласно “карте цветов”. В случае вейвлет-кросс-когерентности обозначается также и фазовое соотношение — стрелочкой внутри окружности. Такая карта создаётся для каждого года. В результате получается набор ежегодных карт, которые могут быть составлены в небольшой “фильм” или же оставлены в виде набора “кадров” — по желанию пользователя.

Описанное программное обеспечение является лишь средством удобного и наглядного расчёта и представления результатов для большого количества станций и большого количества лет, позволяющее объективно и всесторонне оценить “общую картину”. Получающиеся географические карты не только позволяют выделить регионы, в которых наблюдаются исследуемые периодичности, а также “чувствительные” к внешним воздействиям зоны планеты, но и проследить эволюцию сигнала на разных станциях планеты, изменение фазовых соотношений (в случае вейвлет-кросс-когерентности).

## 5.4 Обсуждение результатов

В данном Разделе обсуждаются полученные с помощью методов и программного обеспечения, описанных в Разделе 5.3, результаты, а также проводится сравнение с некоторыми работами других авторов.

### 5.4.1 Цикличности в климате

В работе [245] было проведено исследование географического распределения наличия 11-летней периодичности в рядах данных по приземной температуре воздуха из Глобальной Исторической Климатической Сети (Global Historical Climate Network). Автором [245] было установлено, что 11-летний сигнал наиболее сильно проявляется в Северной Америке.

В представляемой работе было проанализировано географическое распределение станций, в данных которых наблюдаются квази-11- и квази-22-летняя периодичности. Как показало исследование, статистически-значимый сигнал, превышающий порог значимости 95% над уровнем “красного” шума, проявляется далеко не на всех станциях и далеко не всегда. Причём 22-летний сигнал — чуть более явно, нежели 11-летний, но тоже очень нестабильно, далеко не всегда и не везде.

Стоит отметить, что квази-11-летний сигнал наиболее явно проявляется в конце XIX — начале XX столетия на территории Северной Америки, в области Красного моря, в Западной Европе, на юге Африки и на юге Австралии, а также на доступных станциях Экваториальной Атлантики. Сигнал наиболее интенсивен на территории Северной Америки. Во второй половине XX столетия квази-11-летний сигнал лучше всего прослеживается в Западной Европе и в Экваториальной Атлантике. В середине XX века квази-11-летний сигнал интенсивен на территории практически всей Европы и гораздо более ярко выражен, нежели в другие интервалы времени. Эти выводы в некоторых аспектах хорошо согласуются с обсуждаемыми в Разделе 5.1, в частности с работой [245] (касательно территории Северной Америки) и с работой [49] (касательно не только Северной Америки, но и Европейского региона). Однако из полученных в данной работе результатов видно, что наблюдаемые в температурных данных квази-11-летние периодичности очень нестационарны во времени и образуют своего рода “паттерны”, распределённые географически. К сожалению, как уже говорилось выше в Разделе 5.2, имеющиеся в наличии данные для длинного интервала времени не покрывают ни территорию Северной приполярной области, ни Антарктиду и близлежащие к ней

регионы.

Если сравнить полученные здесь результаты с обсуждаемыми в Главе 2, посвящённой циклическим, наблюдаемым в Глобальной температуре, (Раздел 2.2.3), то можно выдвинуть ряд предположений, касающихся вопроса, почему в глобальной температуре квази-11-летняя периодичность носит именно такой характер — значимая в конце XX столетия, на уровне статистически-незначимой тенденции в начале XX века, и практически незаметная тенденция в середине XX столетия. В Разделе 2.2.3) было выдвинуто предположение о том, что значительную роль в наблюдении периодичностей играет комбинированное воздействие солнечной и вулканической активности. Рассмотрим последовательно наблюдаемые квази-11-летние периодичности.

- **Конец XIX — начало XX столетия.** Наблюдающаяся на ряде станций периодичность могла сформировать статистически-незначимый сигнал, наблюдаемый в начале XX столетия в вариациях аномалий Глобальной температуры по данным “NASA-GISS” (Рис. 2.3), “CRU” (Рис. 2.4) и “NCDC” (Рис. 2.5).
- **Середина XX столетия.** Как было показано в Разделе 2.2.3, в вариациях глобальной температуры базы данных “NASA-GISS” на периодичности, близкой к квази-11-летней в этот интервал времени не наблюдается даже статистически-незначимого сигнала. А по результатам для сети метеорологических станций “CRU” — сравнительно ярко наблюдается на территории Европы. Объяснением такого несоответствия может быть то, что в ряде “NASA-GISS” примерно в это же время на частоте, соответствующей квази-22-летней периодичности, уже прослеживался хоть статистически и незначимый, но очень устойчивый сигнал, который мог “заглушить” 11-летний (Рис. 2.3). Похожая ситуация возникает и с рядом глобальной температуры базы данных “NCDC”, с тем лишь отличием, что наблюдающийся в его вейвлет-спектре на частоте, соответствующей квази-22-летней периодичности, сигнал является статистически-значимым. Кроме того, в середине XX столетия в спектре ряда глобальной температуры “NCDC” наблюдается статистически-значимый сигнал на 4-8-летней периодичности (Рис. 2.5).
- **Вторая половина XX столетия.** В вариациях аномалий глобальной температуры по данным из баз данных “NASA-GISS”, “CRU” и “NCDC” наблюдается статистически-значимый пик на частоте, соответствующей квази-11-летней периодичности, слегка смещённый в сторону периода,

равного 9 годам (Рис.2.3 (В), 2.4 (В) и 2.5 (В), соответственно). Как уже обсуждалось, причиной этого вероятнее всего послужил комбинированный эффект солнечной и вулканической активности (два мощных извержения — Эль-Чичон и Пинатубо, — случайно совпали с началом спада солнечной активности 11-летних циклов Швабе). В то же время, как уже говорилось в 2.2.1, одним из отличий базы данных “CRU” от баз “NASA-GISS” и “NCDC” является то, что база “CRU”, не включает данных по приполярным областям ни Северного, ни Южного полушарий. А если речь идёт и о солнечной активности, как о составляющей комбинированного воздействия, то здесь особенно сказываются приполярные области — с точки зрения физики процесса (см. 4.1.2) и из результатов работы [49]. Как уже обсуждалось в 2.2.3, в смысле относительных значений наблюдаемой в конце XX века в вейвлет-спектрах рядов аномалий глобальной приземной температуры воздуха для трёх баз данных (“NASA-GISS”, “NCDC” и “CRU”) квази-11-летней периодичности, можно сказать, что наиболее интенсивно эта периодичность проявляется в рядах “NCDC” и “NASA-GISS”, а в ряде “CRU” — чуть менее интенсивно. Это может послужить объяснением того факта, что в результатах по отдельным метеорологическим станциям “CRU”, не охватывающим приполярные области, 11-летний сигнал наблюдается лишь на территории Европы, в то время как в глобальной температуре он является статистически-значимым. По всей видимости, для того, чтобы рассчитанная по данным базы “CRU” глобальная температура содержала в конце XX столетия квази-11-летний сигнал на статистически-значимом уровне, количество станций, содержащих 11-летний сигнал, является достаточным, если рассматривать это количество относительно количеств, содержащих сигнал на других частотах.

#### **5.4.2 Отклики климата на внешние воздействия: квази-11-летняя периодичность**

На Рис. 5.4 и Рис. 5.5 приведено географическое распределение станций для 1989 г., в данных которых наблюдается квази-11-летний сигнал в вейвлет-когерентности солнечной (А) и вулканической (В) активности с вариациями приземной температуры воздуха. Отличие Рисунков состоит в том, что на Рис. 5.4 приведены результаты со статистической значимостью не менее 95% над уровнем “красного” шума, а на Рис. 5.5 — результаты, амплитуды спектров вейвлет-кросс-когерентности которых составляют не менее 50% от

максимально возможной. То есть, порог статистической значимости результатов на Рис. 5.5 ниже, чем порог статистической значимости результатов на Рис. 5.4. Результаты представлены для 1989 г. 1989 г. находится внутри конуса доверия для результатов, представленных на обоих рисунках (А и В) практически для всех рассматриваемых станций (кроме двух станций). Для, например, уже 1993 г. отклики наблюдаются ещё на чуть большем количестве станций.

Из сравнения Рис. 5.4 и Рис. 5.5 видно, что основные тенденции распределения наличия обсуждаемых когерентностей по планете схожи для обоих Рисунков. Кроме того, видно, что наиболее интенсивна когерентность с солнечной активностью, наблюдаемая в Северной Атлантике. Когерентность с вулканической активностью наблюдается более “повсеместно”, глобально.

Для иллюстрации когерентности между комбинацией вариаций солнечной и вулканической активности и температурными данными для того же 1989г. на Рис. 5.6 и Рис. 5.7 приведены карты распределения откликов приземной температуры воздуха на комбинированное воздействие солнечной и вулканической активности, а также температурного тренда глобального потепления, рассчитанное методом вычисления линейной регрессии по аномалиям глобальной температуры (ряд *GISS* (2.2)) на интервале времени 1975-1995 (4.4.1). Результаты приведены для значений амплитуд спектра вейвлет-кросс-когерентности, уровень статистической значимости которых составляет не менее 95% над уровнем “красного” шума (Рис. 5.6), и для значений амплитуд спектра вейвлет-кросс-когерентности, составляющих не менее 50% от максимально возможной (Рис. 5.7). Как видно из приведённых Рисунков, линейная комбинация солнечной и вулканической активности в 1989 г. имеет даже больший отклик в температурных данных, чем каждый из этих факторов в отдельности.

Как видно, отклик приземной температуры воздуха на вулканический сигнал на периодичности 9-12 лет прослеживается практически по всей планете. Что касается отклика температурных данных на вариации солнечной активности, то в эти годы он наблюдается в температурных данных следующих регионов — в Северном полушарии в Северо-Атлантическом регионе, вдоль Атлантического побережья Северной Африки и Европы, на большей части Западной и Северной Европы, на Севере Евразии. На территории Северной Америки наблюдается небольшой отклик: в последующие годы он становится сильнее, но эти годы оказываются вне “конуса влияния”, хотя тенденция и весьма устойчивая.

Надо сказать, что в отсутствие вулканической активности, оказывающей

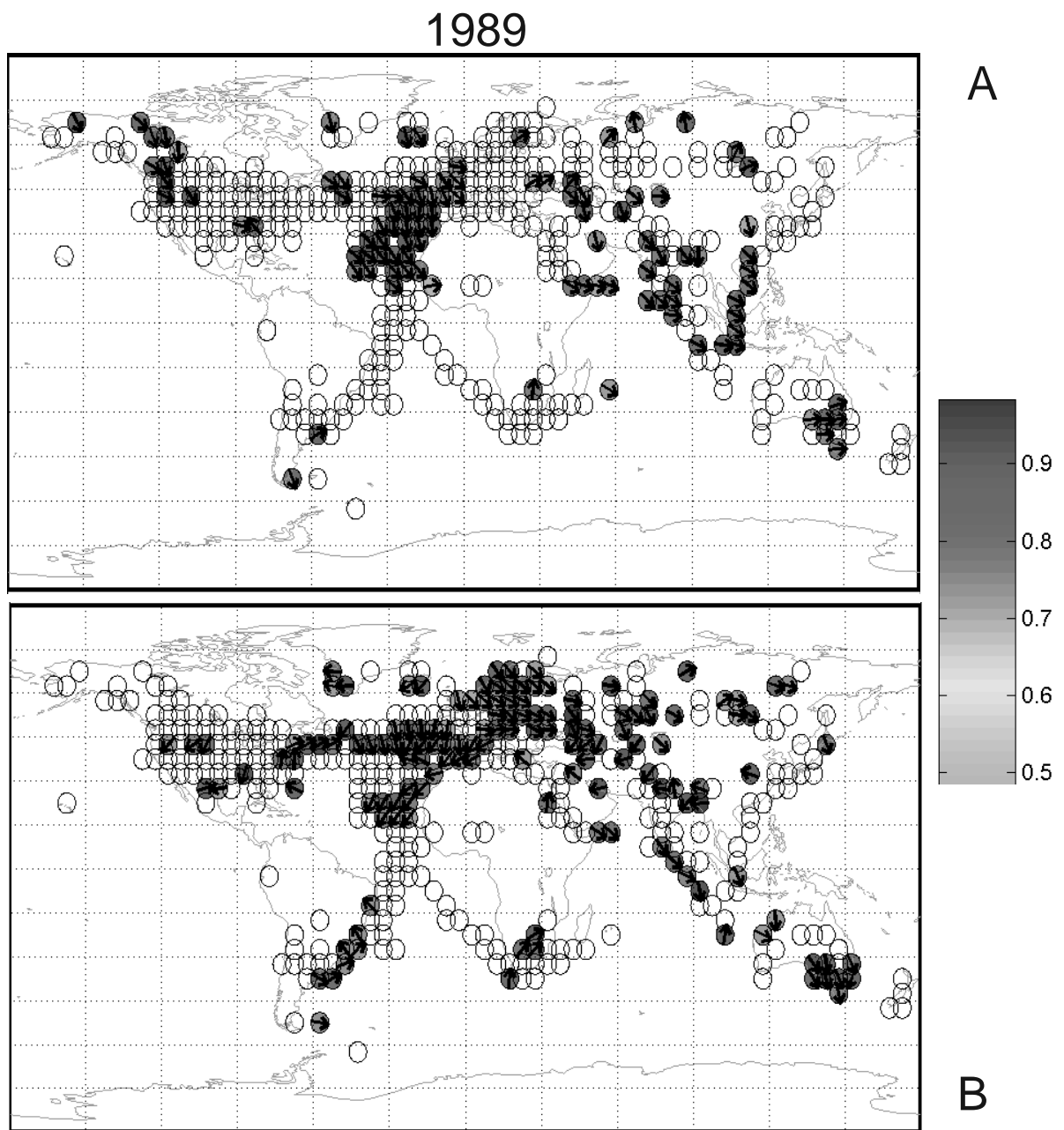


Рис. 5.4: Географическое распределение станций для 1989г., в данных которых наблюдается квази-11-летний сигнал в вейвлет-когерентности солнечной (А) и вулканической (В) активности с вариациями температуры. Окружностями отмечены рассматриваемые метеорологические станции. Для каждой станции, если в спектре вейвлет-когерентности на периоде в интервале от 9 до 12 лет наблюдается статистически-значимый (превышающий порог значимости 95% над уровнем “красного” шума) сигнал, то окружность заполнена цветом согласно интенсивности сигнала в соответствии с картой цветов. Стрелки обозначают наблюдаемое при этом фазовое соотношение. Направление стрелок слева-направо означает, что ряды находятся в фазе, справа-налево — в противофазе, а вертикально вниз — то, что первый ряд (солнечная (А) или вулканическая (В) активность) опережает второй (вариации приземной температуры воздуха) на четверть периода, вверх - означает соответствующее запаздывание.



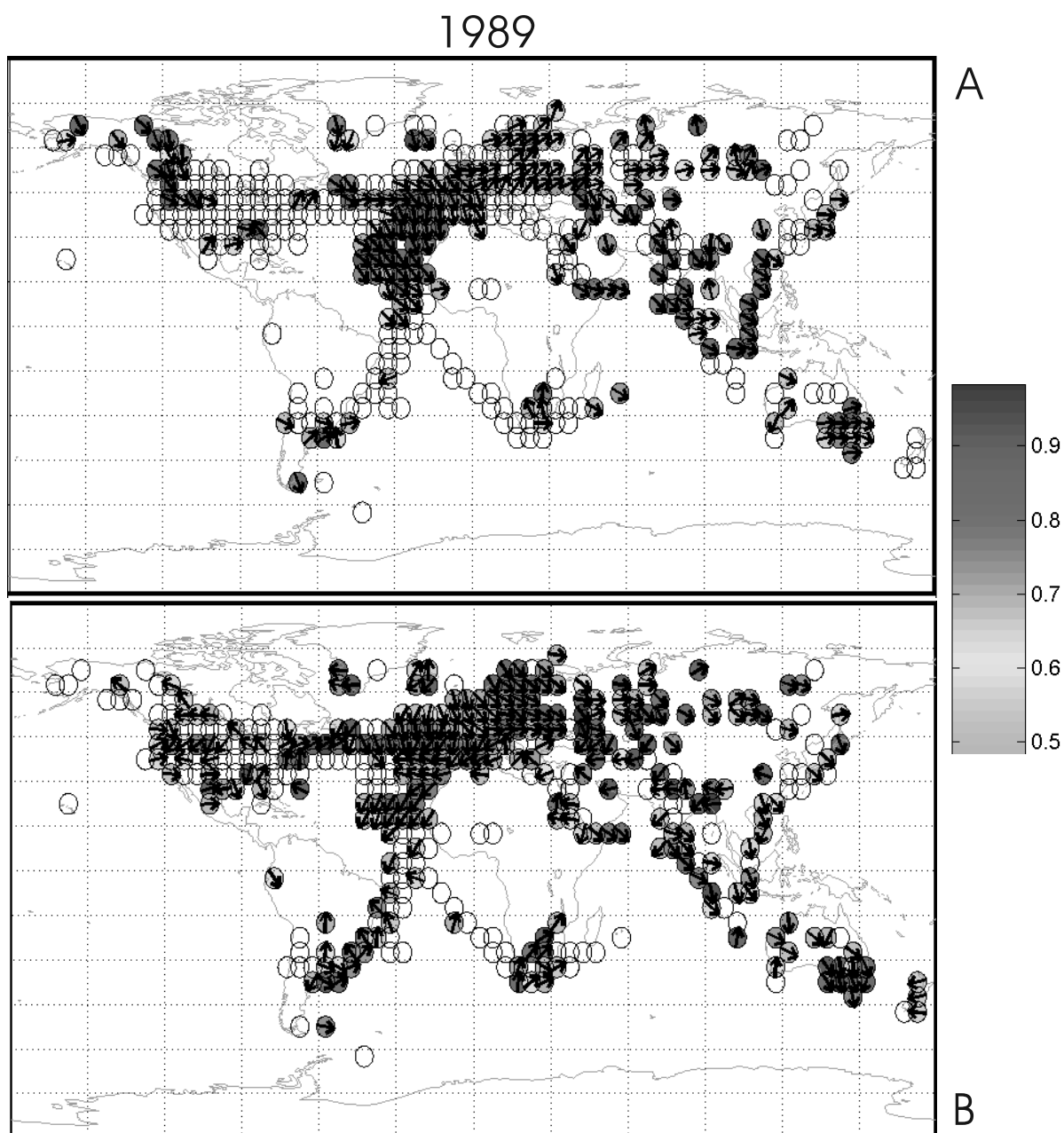


Рис. 5.5: Географическое распределение станций для 1989г., в данных которых наблюдается квази-11-летний сигнал в вейвлет-когерентности солнечной (А) и вулканической (В) активности с вариациями температуры. Окружностями отмечены рассматриваемые метеорологические станции. Для каждой станции, если в спектре вейвлет-когерентности на периоде в интервале от 9 до 12 лет наблюдается сигнал с амплитудой не менее 50% от максимально возможной, то окружность заполнена цветом согласно интенсивности сигнала в соответствии с картой цветов. Стрелки обозначают наблюдаемое при этом фазовое соотношение. Направление стрелок слева-направо означает, что ряды находятся в фазе, справа-налево — в противофазе, а вертикально вниз — то, что первый ряд (солнечная (А) или вулканическая (В) активность) опережает второй (вариации приземной температуры воздуха) на четверть периода, вверх — означает соответствующее запаздывание.

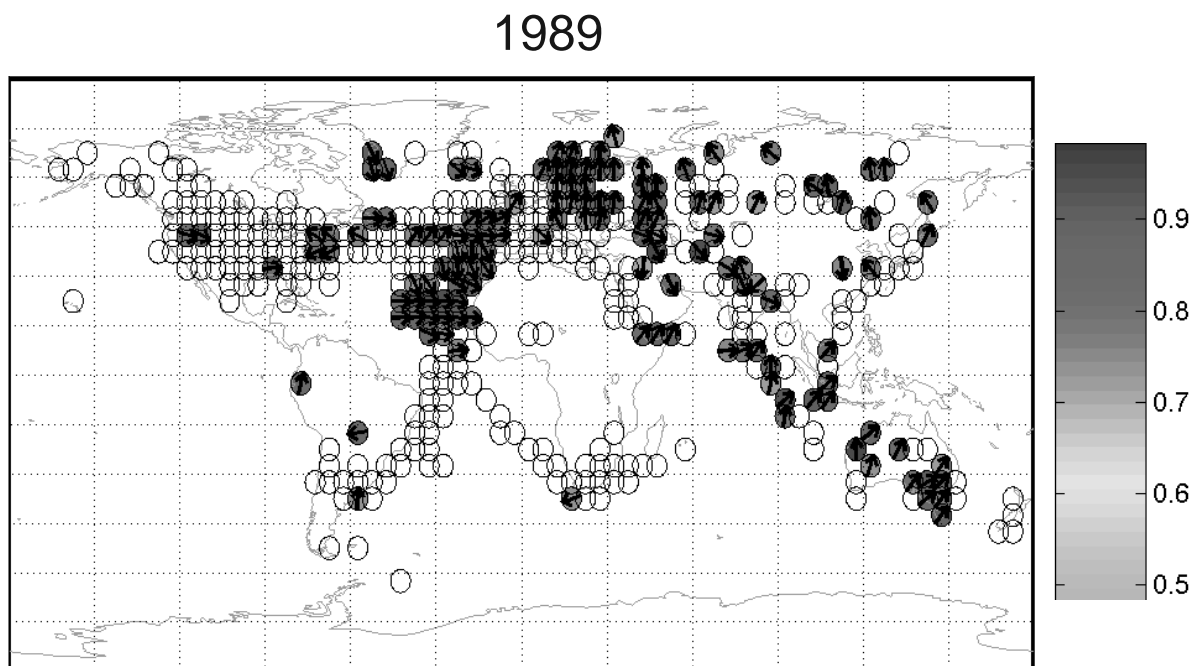


Рис. 5.6: Географическое распределение станций для 1989г., в данных которых наблюдается квази-11-летний сигнал в вейвлет-когерентности линейной регрессии температурного тренда глобального потепления, солнечной и вулканической активности (по аномалиям глобальной температуры (ряд *NASA-GISS* (2.2)) на интервале времени 1975-1995 (4.4.1)) с вариациями температуры. Окружностями отмечены рассматриваемые метеорологические станции. Для каждой станции, если в спектре вейвлет-когерентности на периоде в интервале от 9 до 12 лет наблюдается статистически-значимый (превышающий порог значимости 95% над уровнем “красного” шума) сигнал, то окружность заполнена цветом согласно интенсивности сигнала в соответствии с картой цветов. Стрелки обозначают наблюдаемое при этом фазовое соотношение. Направление стрелок слева-направо означает, что ряды находятся в фазе, справа-налево — в противофазе, а вертикально вниз — то, что первый ряд (солнечная (A) или вулканическая (B) активность) опережает второй (вариации приземной температуры воздуха) на четверть периода, вверх - означает соответствующее запаздывание.

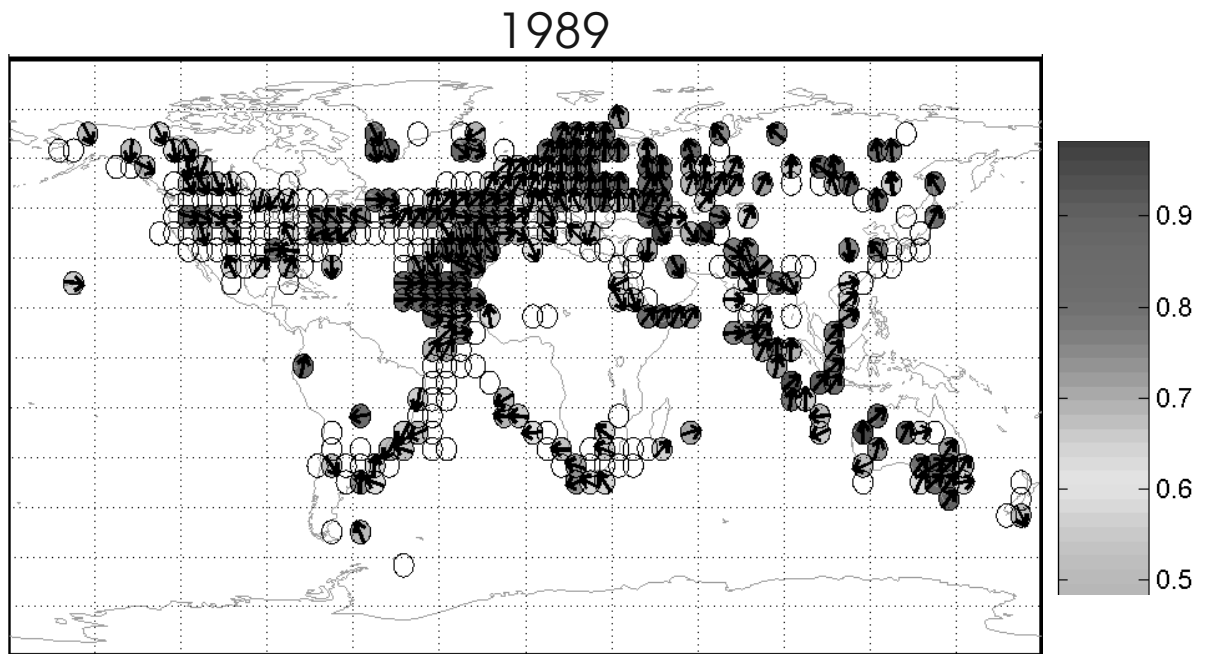


Рис. 5.7: Географическое распределение станций для 1989г., в данных которых наблюдается квази-11-летний сигнал в вейвлет-когерентности линейной регрессии температурного тренда глобального потепления, солнечной и вулканической активности (по аномалиям глобальной температуры (ряд *NASA-GISS* (2.2)) на интервале времени 1975-1995 (4.4.1)) с вариациями температуры. Окружностями отмечены рассматриваемые метеорологические станции. Для каждой станции, если в спектре вейвлет-когерентности на периоде в интервале от 9 до 12 лет наблюдается сигнал с амплитудой не менее 50% от максимально возможной, то окружность заполнена цветом согласно интенсивности сигнала в соответствии с картой цветов. Стрелки обозначают наблюдаемое при этом фазовое соотношение. Направление стрелок слева-направо означает, что ряды находятся в фазе, справа-налево - в противофазе, а вертикально вниз - то, что первый ряд (солнечная (А) или вулканическая (В) активность) опережает второй (вариации приземной температуры воздуха) на четверть периода, вверх - означает соответствующее запаздывание.

воздействие на климат, в данных некоторых метеорологических станций всё-таки содержится статистически-значимый квази-11-летний сигнал. Это может говорить:

- либо о существовании особо чувствительных к вариациям солнечной активности зон,
- либо о том, что имевшие место вулканические извержения, не возымевшие глобальных климатических последствий, имели, однако, локальные отклики,
- либо о случайном совпадении периодичностей: 11-летних локальных периодичностей, происхождение которых не имеет отношения к Солнцу, и 11-летних солнечных.

Рассмотрим для примера временной интервал 1930-1940. Как видно из Рис. 3.4, в это время в климате не наблюдалось глобальных изменений, спровоцированных вулканической деятельностью. На Рис.5.8 и Рис.5.9 приведено географическое распределение метеорологических станций для 1935 г., в данных которых наблюдается вейвлет-когерентность с солнечным 11-летним сигналом. На Рис.5.8 представлены результаты со статистической значимостью не менее 95% над уровнем “красного” шума, а на Рис.5.9 — с амплитудами спектра вейвлет-кросс-когерентности, составляющими не менее 50% от максимально возможной. Как видно из приведённых географических распределений, даже в отсутствие одного из “усиливающих” факторов, а именно — вулканической активности, имеющей глобальные климатические последствия, — в регионе Северной Атлантики, недалеко от северо-западного побережья Африки, наблюдается когерентность. Что, ещё раз, может говорить о том, что этот регион является наиболее “чувствительным” к воздействию солнечной активности на частотах, соответствующим периодам 9-12 лет. Безусловно, остаётся возможность случайного совпадения частот. Но поскольку при анализе вейвлет-кросс-когерентности важен не только факт наличия сигналов на исследуемой частоте в обоих процессах, но и форма сигналов, а также наблюдаемое между ними фазовое соотношение, то вероятность случайного совпадения частот при совпадении всех перечисленных факторов, снижается. Если же говорить о причинах этой периодичности, то ни один из вероятных перечисленных выше источников исключить нельзя. В том числе, могли сыграть роль вулканические извержения с локальными последствиями, которые, согласно списку извержений с сайта “Global Volcanism Programme”

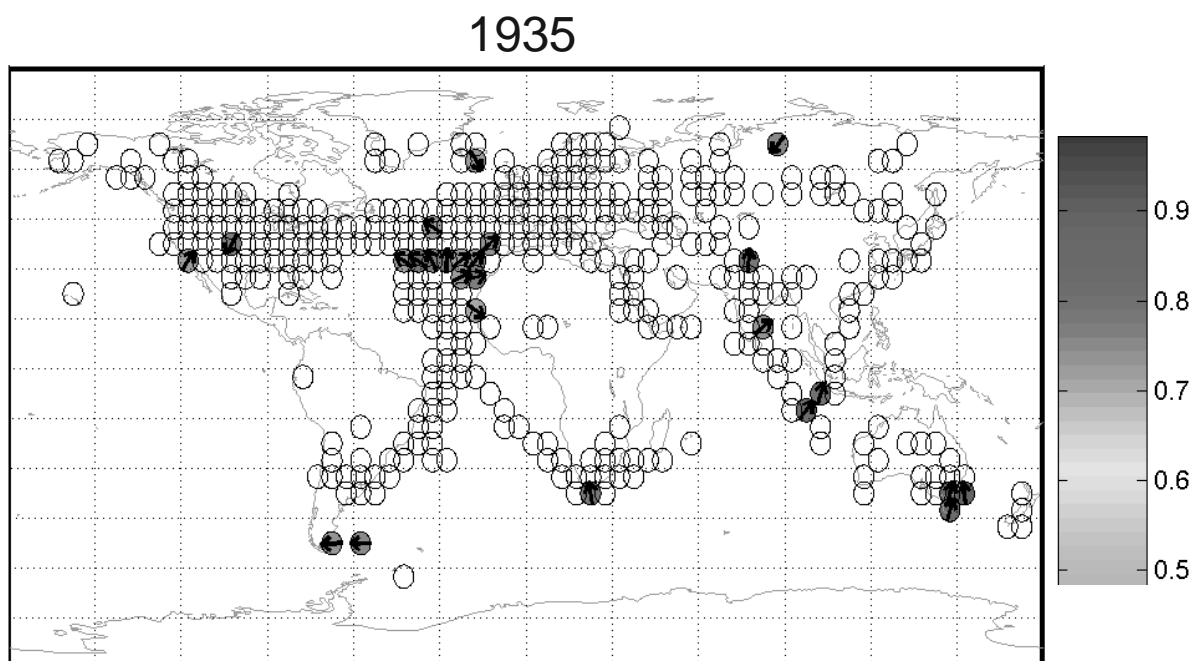


Рис. 5.8: Географическое распределение станций для 1935г., в данных которых наблюдается квази-11-летний сигнал в вейвлет-когерентности солнечной активности с вариациями температуры. Окружностями отмечены рассматриваемые метеорологические станции. Для каждой станции, если в спектре вейвлет-когерентности на периоде в интервале от 9 до 12 лет наблюдается статистически-значимый (превышающий порог значимости 95% над уровнем “красного” шума) сигнал, то окружность заполнена цветом согласно интенсивности сигнала в соответствии с картой цветов. Стрелки обозначают наблюдаемое при этом фазовое соотношение. Направление стрелок слева-направо означает, что ряды находятся в фазе, справа-налево — в противофазе, а вертикально вниз — то, что первый ряд (солнечная активность) опережает второй (вариации приземной температуры воздуха) на четверть периода, вверх — означает соответствующее запаздывание.

(<http://www.volcano.si.edu/>), имели место в обсуждаемое время, хотя и очень слабые, как правило.

### 5.4.3 Отклики климата на внешние воздействия: квази-22-летняя периодичность

Исследование, аналогичное исследованию отклика приземной температуры воздуха в различных географических зонах на внешние воздействия на частотах, близких к соответствующим 11-летней периодичности, было проведено для частот, близких к соответствующим 22-летней периодичности.

В случае когерентности климата с индексом  $DVI_{Global}$  в то время, как значения последнего принимают нулевые или около-нулевые значения, в от-

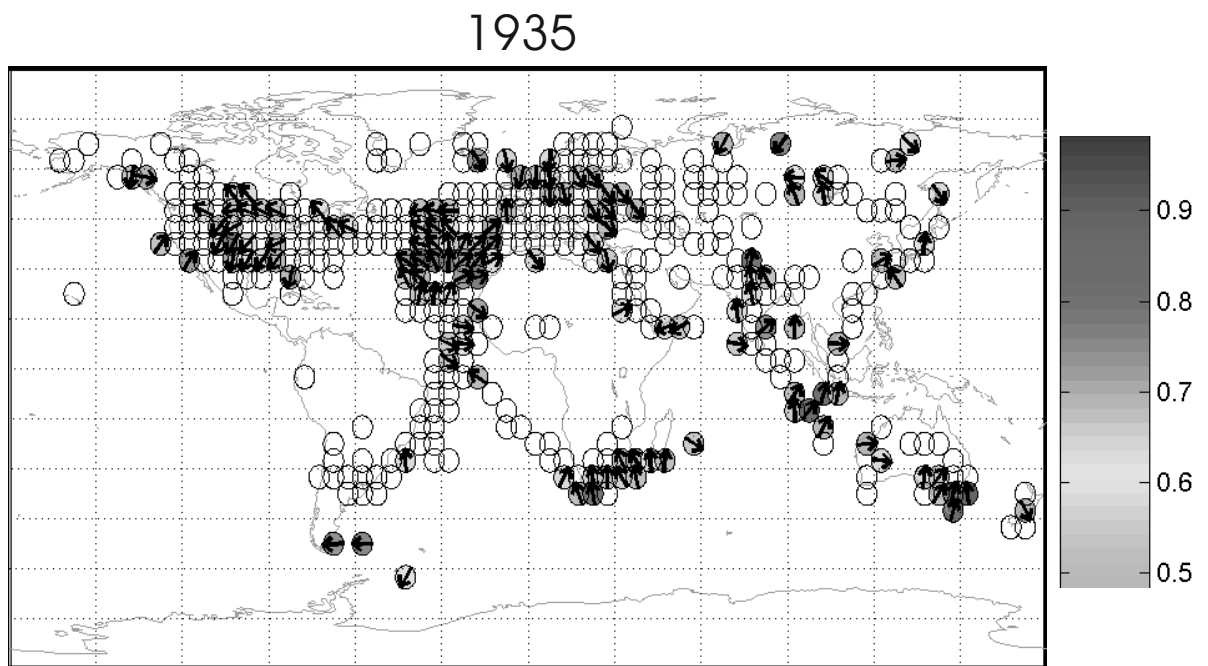


Рис. 5.9: Географическое распределение станций для 1935г., в данных которых наблюдается квази-11-летний сигнал в вейвлет-когерентности солнечной активности с вариациями температуры. Окружностями отмечены рассматриваемые метеорологические станции. Для каждой станции, если в спектре вейвлет-когерентности на периоде в интервале от 9 до 12 лет наблюдается сигнал с амплитудой не менее 50% от максимально возможной, то окружность заполнена цветом согласно интенсивности сигнала в соответствии с картой цветов. Стрелки обозначают наблюдаемое при этом фазовое соотношение. Направление стрелок слева-направо означает, что ряды находятся в фазе, справа-налево — в противофазе, а вертикально вниз — то, что первый ряд (солнечная активность) опережает второй (вариации приземной температуры воздуха) на четверть периода, вверх — означает соответствующее запаздывание.

личие от случая с 11-летней периодичностью, здесь наблюдается отклик для небольшого количества станций, преимущественно — в Северной Америке. Это может объясняться тем, что в качестве “около-22-летнего” рассматривается период от 19 до 25 лет, а интервал времени с практически нулевыми значениями  $DVI_{Global}$  — порядка 25-30 лет. Поэтому проявляющийся отклик на периодах 19-25 лет может быть артефактом, связанным с близостью периодов. Однако, вопрос о природе 22-летней периодичности (слабой, сильно зашумлённой) в климатических данных остаётся открытым.

На Рис. 5.10 и Рис. 5.11 приведены графики географического распределения наличия сигналов в вейвлет-когерентности солнечной (число солнечных пятен, панель “А” обоих Рисунков) и геомагнитной (индекс  $C_9$ , панель “В” обоих Рисунков) активности с вариациями приземной температуры воздуха на около-22-летней периодичности. Под “около-22-летней” подразумевается полоса периодов от 19 до 25 лет. Приведённые Рисунки отличаются разным порогом статистической значимости приводимых на них результатов: не ниже 95% над уровнем “красного” шума — на Рис. 5.10, и условие на амплитуды значений в спектре вейвлет-кросс-когерентности: не менее 50% от максимально возможной — на Рис. 5.11. Как видно, когерентность достаточно сильна как в случае солнечной активности, так и в случае геомагнитной. Но количество станций с наличием сигнала в случае геомагнитной активности значительно больше, чем в случае солнечной. Самыми “чувствительными” зонами, как и в случае квази-11-летней периодичности, остаются Северо-Американский регион, Европа (Западная и Северная), а также полоса вдоль Северо-Западного Атлантического побережья Африки. В случае геомагнитной активности добавляется также регион Индийского и Тихого океанов, который чуть меньше, но “чувствителен”. А вот в Северной части Евразии в случае квази-22-летней периодичности когерентность наблюдается на гораздо меньшем количестве станций.

#### **5.4.4 Статистика наблюдаемых вейвлет-кросс-когерентностей внешних факторов и температуры на 11- и 22-летней периодичности для анализируемой сети метеорологических станций**

Для того, чтобы систематизировать результаты, полученные при исследовании географического распределения вейвлет-кросс-когерентностей между солнечной, геомагнитной активностью — с одной стороны, и вариациями температуры — с другой, был проведён статистический анализ наблюдаемых закономерностей по станциям. Этот анализ состоял в оценке относительного

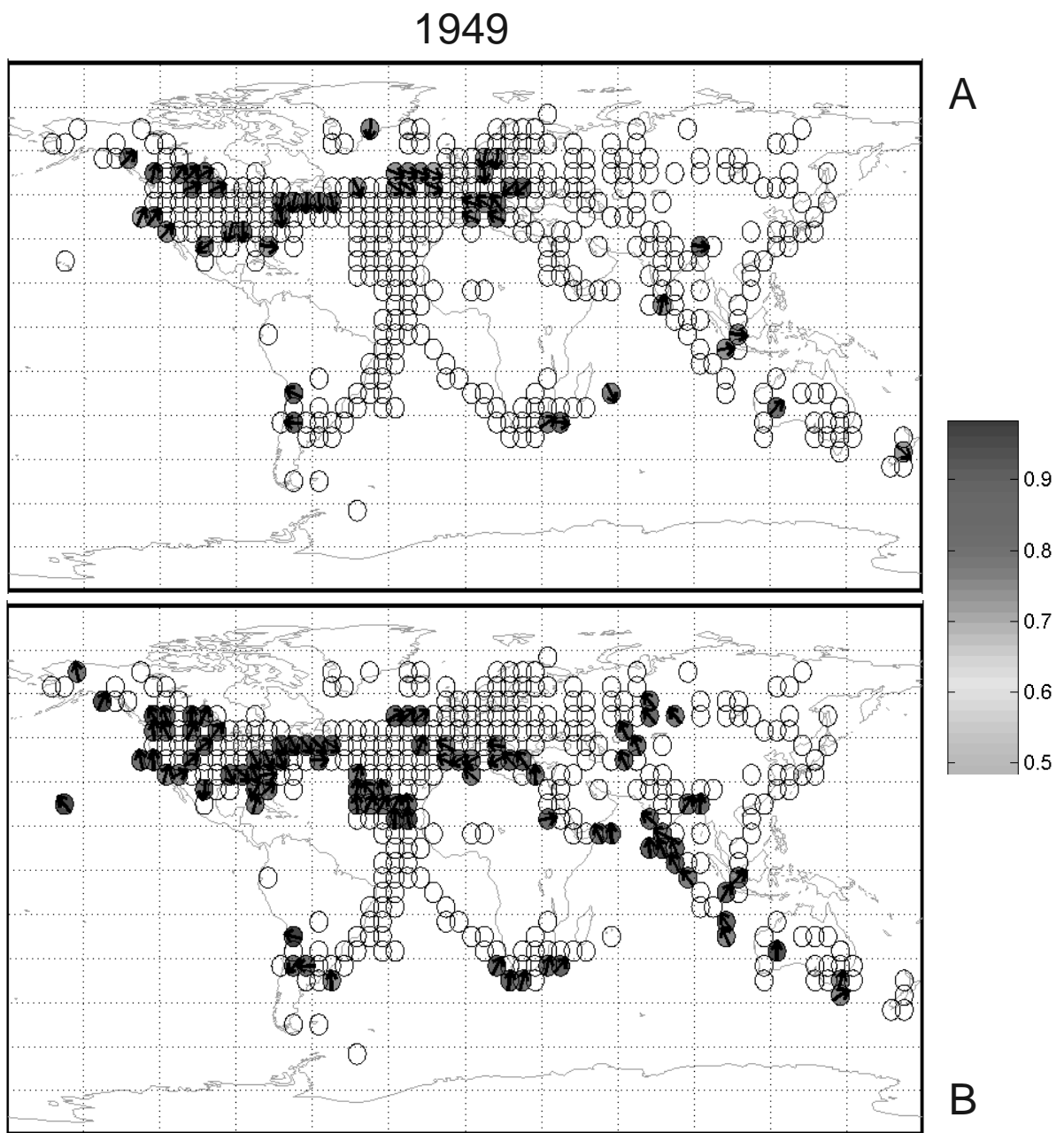


Рис. 5.10: Географическое распределение станций для 1949г., в данных которых наблюдается квази-22-летний сигнал в вейвлет-когерентности солнечной (А) и геомагнитной (В) активности с вариациями температуры. Окружностями отмечены рассматриваемые метеорологические станции. Для каждой станции, если в спектре вейвлет-когерентности на периоде в интервале от 19 до 25 лет наблюдается статистически-значимый (превышающий порог значимости 95% над уровнем “красного” шума) сигнал, то окружность заполнена цветом согласно интенсивности сигнала в соответствии с картой цветов. Стрелки обозначают наблюдаемое при этом фазовое соотношение. Направление стрелок слева-направо означает, что ряды находятся в фазе, справа-налево — в противофазе, а вертикально вниз — то, что первый ряд (солнечная активность) опережает второй (вариации приземной температуры воздуха) на четверть периода, вверх — означает соответствующее запаздывание.



1949

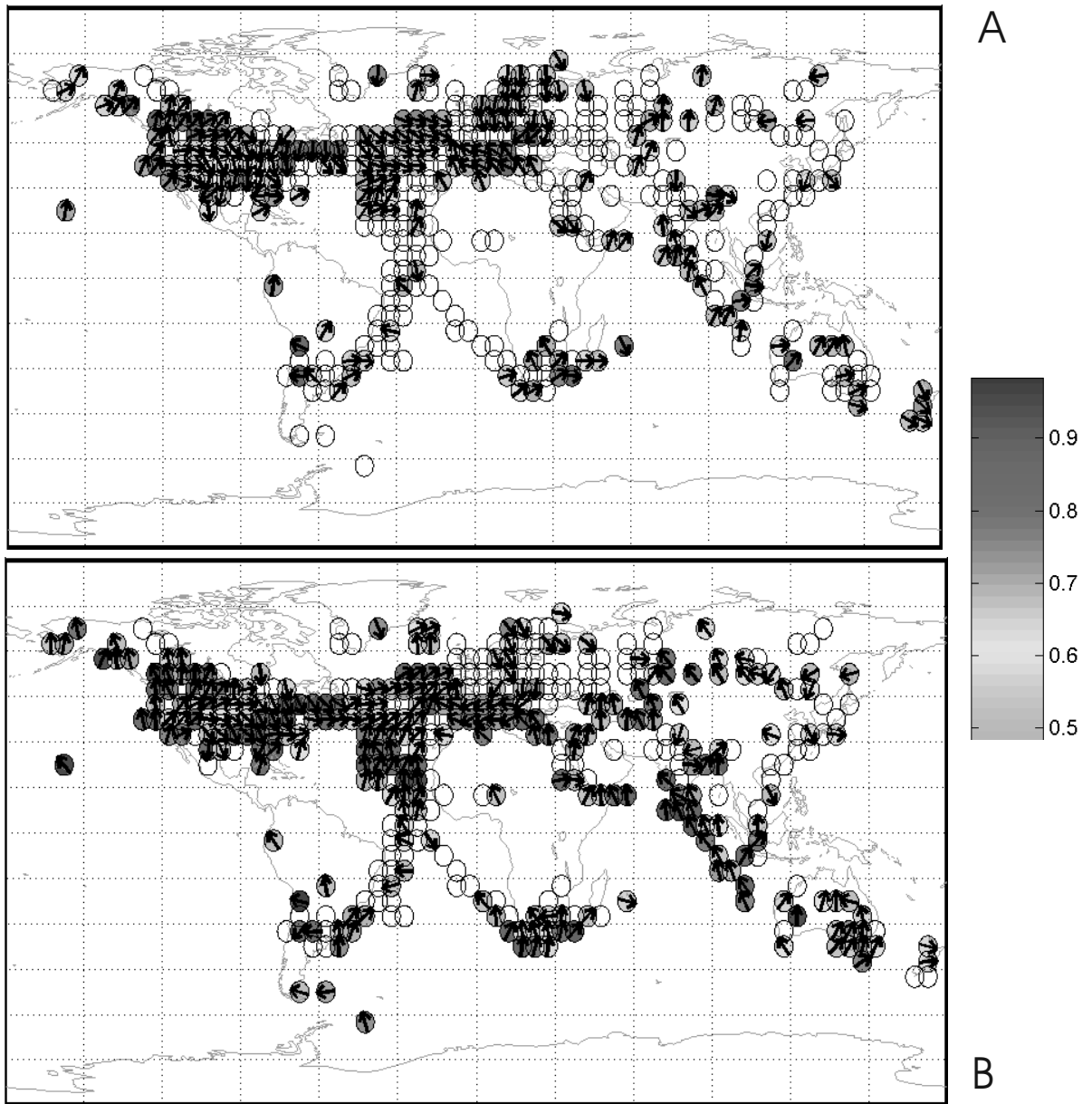


Рис. 5.11: Географическое распределение станций для 1949г., в данных которых наблюдается квази-22-летний сигнал в вейвлет-когерентности солнечной (А) и геомагнитной (В) активности с вариациями температуры. Окружностями отмечены рассматриваемые метеорологические станции. Для каждой станции, если в спектре вейвлет-когерентности на периоде в интервале от 19 до 25 лет наблюдается сигнал с амплитудой не менее 50% от максимально возможной, то окружность заполнена цветом согласно интенсивности сигнала в соответствии с картой цветов. Стрелки обозначают наблюдаемое при этом фазовое соотношение. Направление стрелок слева-направо означает, что ряды находятся в фазе, справа-налево — в противофазе, а вертикально вниз — то, что первый ряд (солнечная активность) опережает второй (вариации приземной температуры воздуха) на четверть периода, вверх - означает соответствующее запаздывание.

количества станций — для каждого типа анализируемых когерентностей, для каждого значения анализируемых периодов (когерентность вариаций солнечной активности и приземной температуры воздуха на 11-летней периодичности, когерентность вариаций солнечной активности и приземной температуры воздуха на 22-летней периодичности, когерентность вариаций геомагнитной активности и приземной температуры воздуха на 22-летней периодичности), — для которых статистически-значимая когерентность наблюдается.

Статистика формировалась следующим образом:

- все станции, рассматриваемые при анализе вейвлет-кросс-когерентности, были разделены на сектора. На Рис. 5.12 приведена географическая карта с нанесёнными на неё используемыми в этой Главе метеорологическими станциями и секторами для статистического анализа. Выбор именно такого деления был основан на следующих критериях:
  - в каждый сектор брались станции, расположенные не очень далеко друг от друга, находящиеся рядом географически;
  - сектора выбирались таким образом, чтобы количество станций, попадающих в каждый из секторов, не очень сильно отличалось от количества станций в других секторах, что, к сожалению, далеко не для всех секторов удалось сделать;
  - сектора выбирались с учётом результатов анализа вейвлет-кросс-когерентности для случаев, когда регионы, в которых наблюдаются статистически-значимые сигналы сами собой образовали явные группы;
- для каждого типа анализируемой когерентности на выбранной периодичности брался интервал времени, по которому формировалась статистика. Интервал времени должен был полностью находиться внутри “конуса влияния”. В случае квази-11-летней периодичности в когерентности солнечной активности и температуры в конце XX столетия, когда имел место комбинированный эффект солнечной и вулканической активности, для “чистоты” статистики брался интервал времени, не затрагивающий конец XX века, чтобы исключить факторы не солнечного происхождения. Итак, для формирования статистики были выбраны следующие временные интервалы:
  - для статистики по когерентности *вариаций солнечной активности и температуры на 11-летней периодичности (полоса периодов 9-12 лет)*: 1920-1960 гг.,

- для статистики по когерентности *вариаций солнечная активность и температуры на 22-летней периодичности (полоса периодов 19-25 лет)*: 1940-1960 гг.,
- для статистики по когерентности *вариаций геомагнитная активность и температуры на 22-летней периодичности (полоса периодов 19-25 лет)*: 1940-1960 гг.;
- подсчёт количества станций производился следующим образом:
  - для каждого типа исследуемой когерентности на выбранном интервале времени (см. предыдущий этап) вычислялось общее число станций, на которых наблюдалась анализируемая когерентность,
  - полученное общее число станций нормировалось на количество лет в выбранном интервале времени,
  - полученное число станций в год нормировалось на общее количество станций в рассматриваемом секторе. Таким образом, для каждого сектора получается значение “средне-взвешенного” количества станций в год, на которых наблюдается статистически-значимый сигнал в когерентности. Эта величина уже является отражающей статистику. Однако, для того, чтобы наглядно представить относительные значения “средне-взвешенного” количества станций по секторам для каждого типа обсуждаемой когерентности, предлагается, подсчитав эти значения для всех трёх типов рассматриваемых когерентностей, отнормировать каждое из значений на максимальное из них. В этом случае удобнее сравнивать построенные гистограммы между собой;
  - полученные относительные значения строились в двух видах: в виде гистограмм — зависимостей полученных относительных значений для номеров секций, и в виде географических карт, на которых те же самые относительные значения отмечены в виде кружков радиуса, соответствующего значению.

На Рис. 5.13 и Рис. 5.14 приведены результаты статистики. Отличие этих Рисунков состоит в том, что на Рис. 5.13 представлены результаты статистики для вейвлет-кросс-когерентности, имеющей уровень статистической значимости не менее 95% над уровнем “красного” шума, а на Рис. 5.14 — результаты статистики для вейвлет-кросс-когерентности, амплитуды спектра которой составляют не менее 50% от максимально возможной. На левых панелях обоих Рисунков ((А), (С), (Е)) помещены гистограммы количества станций (в относительных единицах) для каждого сектора (номера секторов отложены по

оси абсцисс). На правых панелях обоих Рисунков ((B), (D), (F)) представлена та же статистика, что и на гистограммах, но в форме нанесённых на географическую карту, в центре каждого сектора, кружков, радиус каждого из которых пропорционален количеству станций (в относительных единицах) соответствующего ему сектора. На обоих представленных Рисунках статистика приведена для трёх видов когерентности: (A), (B) — для когерентности *вариаций солнечной активности и температуры на 11-летней периодичности (полоса периодов 9-12 лет) по интервалу времени 1920-1960 гг.*; (C), (D) — для когерентности *вариаций солнечной активности и температуры на 22-летней периодичности (полоса периодов 19-25 лет): по интервалу времени 1940-1960 гг.*; (E), (F) — для когерентности *вариаций геомагнитной активности и температуры на 22-летней периодичности (полоса периодов 19-25 лет): по интервалу времени 1940-1960 гг.*

Анализируя приведённую на Рис. 5.13 и Рис. 5.14 статистику наблюдаемых когерентностей, хотелось бы подчеркнуть некоторые особенности:

- результаты статистики для разных уровней статистической значимости наблюдаемой в разных географических секторах вейвлет-кросс-когерентности (Рис. 5.13 и Рис. 5.14) ведут себя схожим образом, изменяются абсолютные значения величин, характеризующих количество станций для каждого из секторов, но общие тенденции и закономерности сохраняются;
- из наблюдаемых когерентностей между вариациями солнечной, геомагнитной активности и вариациями температуры на 11- и 22-летних периодах, наиболее интенсивной и наиболее распространённой по планете является когерентность геомагнитной активности с температурой на 22-летней периодичности ((E) и (F)). Далее следует когерентность солнечной активности с температурой на 11-летней периодичности ((A) и (B)). Наименее “повсеместной” является когерентность солнечной активности с температурой на 22-летней периодичности ((C) и (D)), однако, в тех секторах, где по статистике она есть, она интенсивнее 11-летней ((A) и (B));
- когерентности, наблюдающиеся на 22-летней периодичности ((C)(D) и (E)(F)), ведут себя очень похожим образом, однако в случае геомагнитной активности ((E) и (F)), она гораздо интенсивнее;
- сектора, в которых наиболее сильна когерентность между солнечной, геомагнитной активностью и температурой на 11- и 22-летней периодичности, совпадают с теми регионами, которые были выявлены выше, по

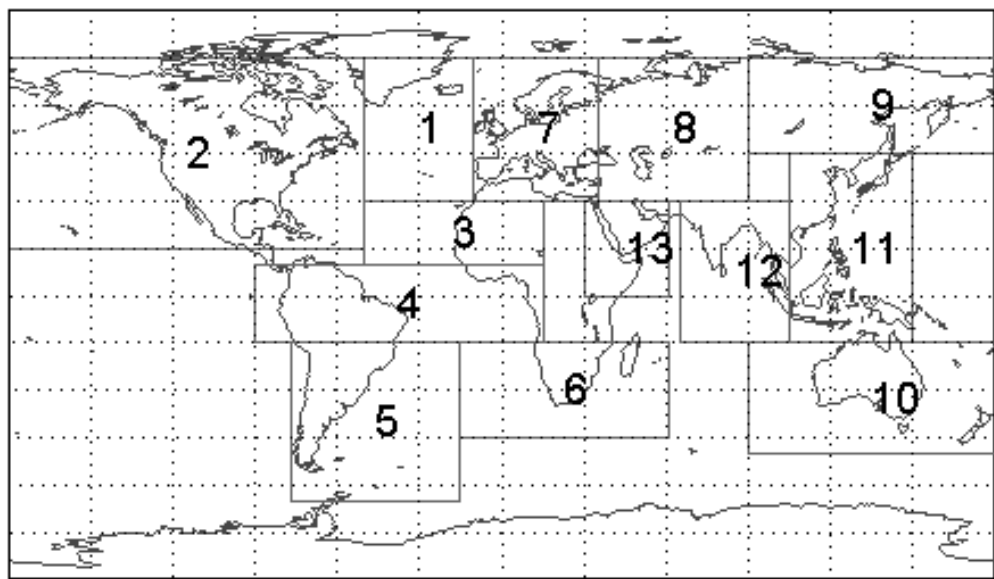


Рис. 5.12: Географические сектора, выбранные для статистического анализа результатов исследования вейвлет-кросс-когерентности между солнечной, геомагнитной активностью и вариациями приземной температуры воздуха на 11- и 22-летних периодах.

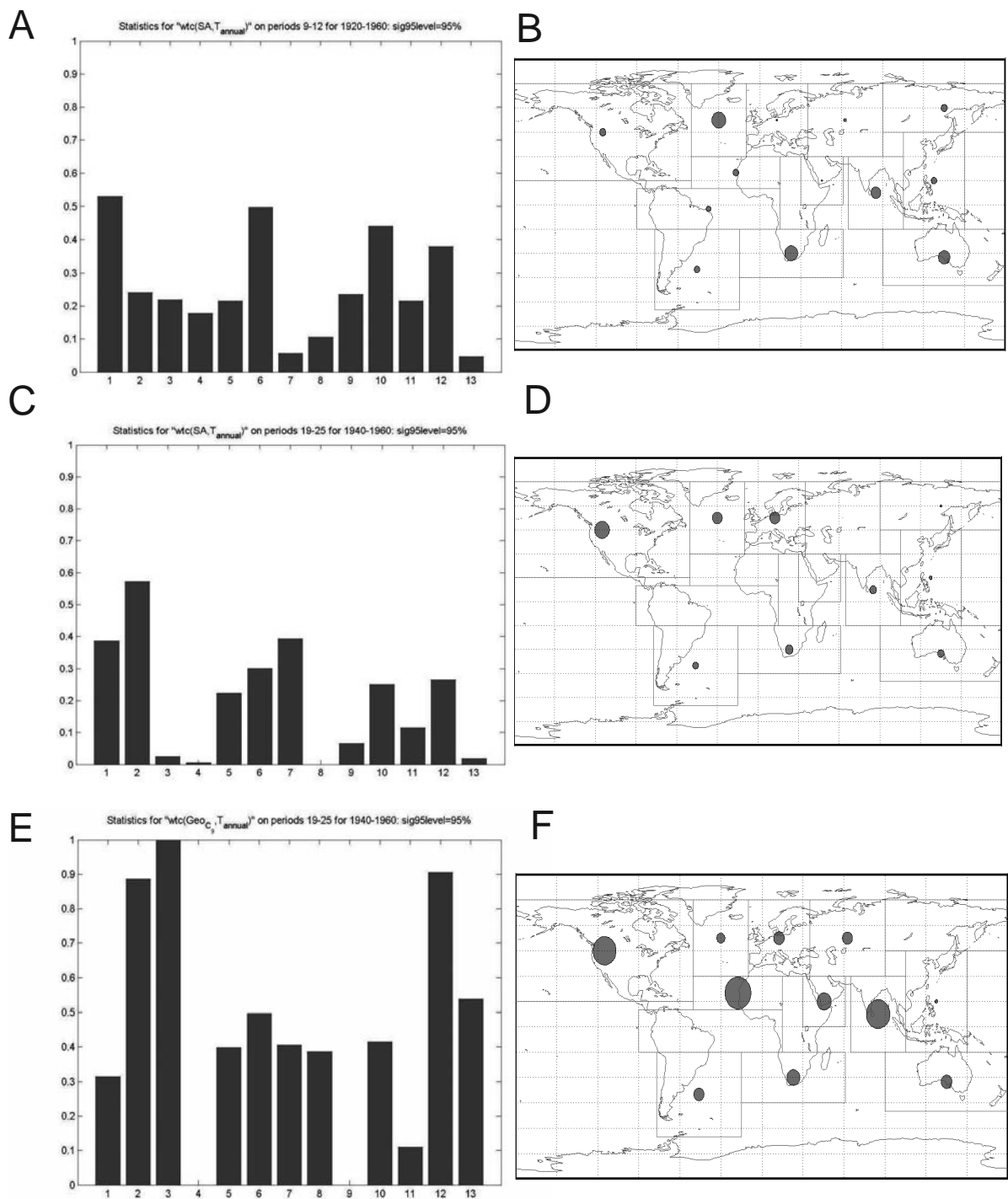


Рис. 5.13: Статистика количества станций, где наблюдаются статистически-значимая (95% и выше над уровнем “красного” шума) когерентность между солнечной, геомагнитной активностью и вариациями температуры на 11- и 22-летней периодичности. Статистика по когерентности: (A), (B) — солнечной активности и температуры на 11-летней периодичности (полоса периодов 9-12 лет) за 1920-1960 гг. (C), (D) — солнечной активности и температуры на 22-летней периодичности (полоса периодов 19-25 лет): за 1940-1960 гг. (E), (F) — геомагнитной активности и температуры на 22-летней периодичности (полоса периодов 19-25 лет): за 1940-1960 гг.

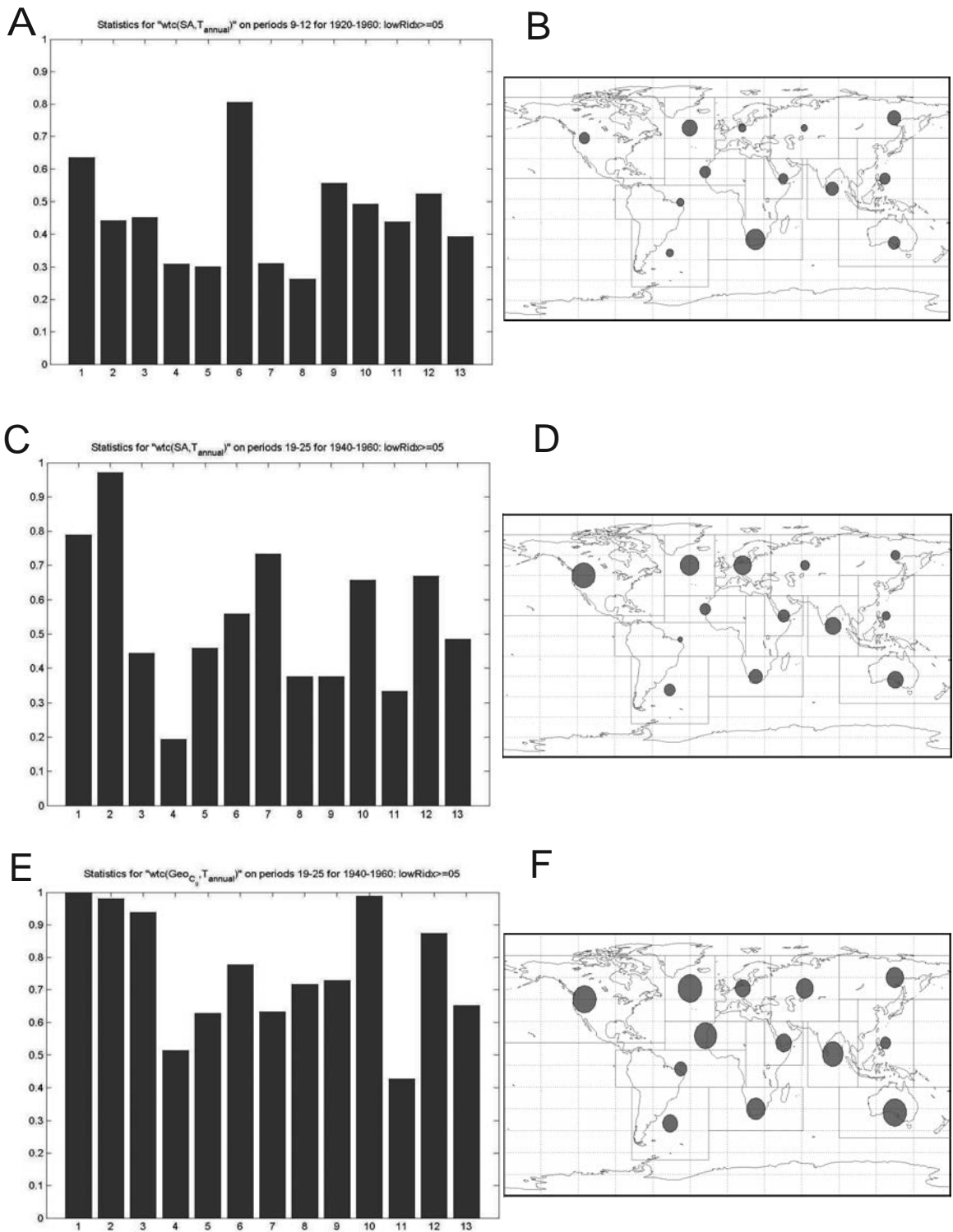


Рис. 5.14: Статистика количества станций, где наблюдаются когерентность, амплитуды спектра которой составляют не менее 50% от максимально возможной, между солнечной, геомагнитной активностью и вариациями температуры на 11- и 22-летней периодичности. Описание (A), (B), (C), (D), (E), (F) — аналогично описанию к (A), (B), (C), (D), (E), (F) на Рис. 5.13.

данным о географическом распределении откликов (Рис. 5.5, 5.7, 5.9, 5.11): Северная Америка, Северная Атлантика, северо-запад Африканского континента, а также север Индийского океана. Наименее ярко когерентности между геомагнитной, солнечной активностью и температурой наблюдаются в секторах, включающих север Южной Америки и часть Атлантики на этих же широтах. Распределение интенсивности сигнала по секторам отличается для 11- и 22-летней периодичности. Для 11-летней периодичности распределение более равномерно по планете.

Необходимо отметить, что хотя и проводилась нормировка на количество станций для каждой из исследуемых секторов, но, тем не менее, нужно иметь ввиду неравномерность количества анализируемых при формировании статистики станций в секторах.

#### **5.4.5 “Чувствительные” к внешним воздействиям климатические зоны**

Из сопоставления полученных для квази 11- и квази-22-летней периодичности в когерентности солнечной и геомагнитной активности с вариациями температуры, приведёнными на Рис. 5.5, 5.7, 5.9, 5.11, с распределением по планете “чувствительных” климатических зон, в которых климат наиболее переменчив (Рис. 5.1), можно заметить, что климатические зоны, в которых наблюдается 11- и 22-летний сигналы в спектрах вейвлет-когерентности с рассмотренными внешними параметрами, в большинстве своём географически совпадают с наиболее “чувствительными”, с точки зрения вариабельности климата, регионами.

### **5.5 Выводы к Главе 5**

Ниже приведено краткое резюме **результатов**, полученных в Главе 5:

- статистически-значимые квази-11- и квази-22-летняя вариации в данных по температуре наблюдаются далеко не всегда и не везде, но можно отметить наиболее “вариабельные” в этом смысле зоны, которыми являются Северная Америка и Европа;
- отклик климата на интенсивные (в терминах данного исследования — имеющие заметные глобальные климатические последствия) вулканические извержения наблюдается в вариациях температуры практически на всём земном шаре;



- по результатам проведённого исследования, наиболее “чувствительными” к внешним воздействиям солнечного происхождения климатическими зонами являются: регионы Северо-Западной Европы, Северной Америки, Северо-Западного побережья Африки. В этих зонах отклик на солнечный 11-летний сигнал присутствует и при низкой вулканической активности, эффект виден сам по себе, а не только в случае “усиления” цикла благодаря комбинированному воздействию солнечной активности и вулканической деятельности;
- в интервалы времени, когда имеется комбинированное воздействие солнечной активности и вулканической деятельности на климат, отклик на 11-летний солнечный сигнал наблюдается не только в “чувствительных” климатических зонах, где он выражен гораздо более ярко по сравнению со “спокойными” периодами, но и в зонах, географически значительно больших по сравнению с границами “чувствительных”;
- вейвлет-кросс-когерентность вариаций солнечной активности и вариаций приземной температуры воздуха на частоте, соответствующей квази-22-летней периодичности, наблюдается в 1920-1960 гг. в большей части исследованных регионов: не только в “чувствительных” климатических зонах, но на значительно большей территории; возможно когерентность приземной температуры с солнечной активностью на 22-летней периодичности проявляется в отсутствие более сильных сигналов, в данном случае когерентность наблюдается в интервал времени, когда уровень климатических последствий вулканической деятельности ( $DVI_{Global}$ ) практически равен нулю;
- вейвлет-кросс-когерентность вариаций геомагнитной активности и вариаций приземной температуры воздуха на частоте, соответствующей квази-22-летней периодичности, наблюдается практически всегда и во всех регионах планеты (по результатам, полученным на данном материале и для исследуемого интервала времени), и выражена более ярко, чем в случае когерентности солнечной активности с вариациями глобальной температуры на частоте, соответствующей квази-22-летней периодичности;
- среди когерентностей, наблюдаемых между изменениями солнечной, геомагнитной активности и вариациями температуры на 11- и 22-летних периодичностях, наиболее сильная наблюдается в случае геомагнитной активности на 22-летнем периоде, когерентность вариаций приземной

температуры воздуха с солнечной активностью на 11-летнем периоде и с солнечной активностью на 22-летнем периоде являются менее интенсивными, при этом наименее “повсеместно” наблюдающейся является когерентность солнечной активности с температурой на 22-летней периодичности, наиболее равномерно распределена по планете когерентность на 11-летней периодичности, распределения для случаев геомагнитной и солнечной активности на 22-летней периодичности ведут себя схожим образом. Наиболее “чувствительные” сектора, согласно результатам статистики, совпадают с выявленными по отдельным географическим распределениям наблюдаемых когерентностей: это Северная Америка, Северная Атлантика, Северо-Западное побережье Африки, в случае геомагнитной активности — ещё север Индийского океана, наименее интенсивны когерентности в секторах, соответствующим северу Южной Америки и части Атлантики на тех же широтах.

Из результатов проведённого в этой части диссертации исследования (Глава 5), можно сделать следующие **выводы**:

- наиболее “чувствительной” к вариациям солнечной активности географической зоной является Северная Атлантика;
- среди исследованных откликов климата на солнечную и геомагнитную активность на 11- и 22-летней периодичности на наибольшем количестве станций когерентность наблюдается в случае геомагнитной активности на 22-летней периодичности.

## Заключение

В задачи данной работы входило исследование воздействия солнечной и вулканической активности на климат Земли на частотах, соответствующим 11- и 22-летним периодичностям.

В ходе исследования были рассмотрены вариации глобальных значений приземной температуры воздуха и выявлены содержащиеся в них периодичности. Установлено, что наблюдаемые периодичности, как правило, нестабильны — в частности, квази-11-летняя периодичность наблюдается в вариациях аномалий глобальной температуры лишь во второй половине XX столетия.

Рассмотрены возможные внешние причины возникновения квази-11-летней периодичности: в частности, в работе обсуждается комбинированное воздействие солнечной и вулканической активности на приземную температуру воздуха — глобальную и по станциям, что, согласно выводам автора, и явилось причиной наблюдаемой во второй половине XX столетия квази-11-летней периодичности в климате Земли.

Для выявления связи между вариациями внешних факторов и приземной температуры воздуха были рассмотрены когерентности вариаций внешних параметров — солнечной активности и вулканической деятельности — с аномалиями вариаций глобальных значений температуры воздуха. В ходе исследования обсуждаются возможные причины наблюдаемых когерентностей и выделены наиболее вероятные из них.

Кроме того, были изучены соотношения и между самими рассматриваемыми внешними факторами. Обсуждаются наблюдаемые между ними когерентности и возможные причины их возникновения.

В спектре вейвлет-кросс-когерентности рядов вулканической активности и глобальной температуры наблюдается когерентность, соответствующая декадной вариации. Начиная примерно с 1960-х годов, 11 летняя квазипериодичность наблюдается и в спектре вейвлет-когерентности рядов солнечной активности и глобальной температуры. В результате проведенного анализа можно сделать заключение, что причиной наблюдаемой во второй поло-

вине XX века декадной вариации глобальной температуры является результатом комбинированного воздействия на климат солнечной активности и вулканической деятельности. Ключевую роль в этом сыграло фазовое соотношение между сильными вулканическими извержениями и солнечными циклами. Явным образом солнечный сигнал проявляется в вариациях климата лишь при соответствующей фазовой привязке вулканической деятельности к солнечному циклу. Именно тогда складываются благоприятные условия для раскачки декадных климатических колебаний, как это имело место во второй половине XX-го века после сильных извержений вулканов. Выдвигается предположение, что высокий уровень когерентности между солнечным и температурным рядами с 1920 г. по 1960 г. на частоте, соответствующей квази-22-летней периодичности объясняется отсутствием вулканических извержений, влекущих сильные глобальные климатические последствия. Кроме того, предполагается, что такого рода когерентность между солнечным и температурным рядами на частоте, соответствующей квази-22-летней периодичности, существует всегда в отсутствие вулканической активности с сильными глобальными последствиями.

Чтобы установить, какой именно процесс на Солнце ответственен за наличие квази-11- и квази-22-летних сигналов в когерентности между вариациями солнечной активности и вариациями приземной температуры воздуха, была исследована вейвлет-кросс-когерентность между геомагнитной активностью и глобальной температурой. В результате проведённого исследования было установлено, что вероятнее всего, за когерентность между солнечной активностью и вариациями приземной температуры воздуха на частоте, соответствующей 11-летней периодичности, ответственны мелкомасштабные магнитные поля солнечных пятен, а 22-летней периодичности — крупномасштабные магнитные поля солнечной короны.

Описанное выше исследование (а именно: изучение периодичностей в приземной температуре воздуха, а также когерентностей температуры с внешними процессами — солнечной, геомагнитной активностью и вулканической деятельностью) были проведены не только для значений глобальной приземной температуры воздуха, но и для данных метеорологических станций, распределённых по земному шару. Это было сделано с целью выявления и исследования географического распределения “чувствительных” к внешним воздействиям климатических зон. Было установлено, что не всегда и не во всех регионах на планете наблюдается отклик на те или иные внешние воздействия, причём это распределение “чувствительных” зон различно для различных внешних параметров и периодичностей. В частности, интенсивные вул-

канические извержения влекут за собой климатические последствия, более или менее ярко отражающиеся в температурных данных большинства регионов планеты; когерентность между геомагнитной активностью и приземной температурой воздуха на 22-летней квазипериодичности наблюдается практически всегда и в большинстве регионов. Существуют географические зоны, наиболее “чувствительные” к внешним воздействиям. В этих зонах отклик на солнечный 11-летний сигнал присутствует и при низкой вулканической активности, эффект виден сам по себе, не за счёт “усиления” цикла благодаря комбинированному воздействию солнечной и вулканической активности. Для систематизации результатов, полученных в части исследования по метеорологическим станциям, была сформирована статистика наблюдения когерентностей между вариациями солнечной, геомагнитной активности и приземной температуры воздуха, подтвердившая выводы, полученные с помощью анализа географических распределений интенсивности наблюдения отдельно взятых когерентностей. В результате исследования, как наиболее “чувствительные” в смысле наличия когерентности с такими параметрами, как солнечная и геомагнитная активность, были выделены регионы Северо-Западной Европы, Северной Америки, Северо-Западного побережья Африки. В случае когерентности на 22-летней периодичности, к перечисленным регионам следует добавить север Индийского океана. Наименее интенсивно когерентность наблюдается на севере Южной Америки и в части Атлантики на этих же широтах. Наиболее интенсивен сигнал в случае когерентности с приземной температурой воздуха геомагнитной активности на 22-летней периодичности. Наиболее “повсеместно” распределена по планете — когерентность температуры с солнечным 11-летним сигналом. Статистика распределения секторов, где наблюдается интенсивная когерентность приземной температуры с солнечным 22-летним и геомагнитным 22-летним сигналом, ведёт себя схожим образом, но геомагнитный сигнал — гораздо интенсивнее.

## Основные результаты, полученные в работе

Проведено исследование воздействия солнечной и вулканической активности на декадные вариации климата Земли, позволившее получить ряд новых результатов:

1. Квази-11-летний цикл в аномалиях глобальной приземной температуры воздуха во 2-ой половине XX столетия вероятнее всего вызван комбинированным воздействием солнечной и вулканической активности вследствие “благоприятного” совпадения фаз между солнечной и вулканической активностью;
2. Квази-22-летний сигнал в аномалиях глобальной приземной температуры воздуха обусловлен главным образом вариациями солнечной активности и наблюдается в отсутствие более интенсивных факторов, таких, как извержения вулканов с ненулевыми значениями DVI-индекса;
3. Северо-Атлантический регион является наиболее вариабельной климатической зоной, наиболее “чувствительной” к 11- и 22-летнему солнечным сигналам.
4. Из всех изученных зависимостей от факторов солнечного происхождения отклик температуры на 22-летнюю вариацию геомагнитной активности оказывается самым глобальным (наблюдается на максимальном количестве станций).
5. Солнечная и вулканическая активность когерентны на мультидекадных масштабах в течение последних 400 лет.

# Благодарность

- Автор выражает благодарность ряду организаций и фондов, при частичной финансовой поддержке которых была сделана данная работа. Работа над кандидатской диссертацией была поддержана:
  1. Грантом Администрации Санкт-Петербурга для студентов, аспирантов, молодых учёных и специалистов (2002 г.);
  2. Грантом Администрации Санкт-Петербурга и Международной Соросовской Программы Образования в Области Точных Наук (ISSEP) в рамках конкурса “Грант Санкт-Петербурга” (2002 г., 2003 г.);
  3. NANSEN грантом (2003);
  4. Министерством Образования и Науки Российской Федерации, грант № 37852 (2005).
- Автор выражает благодарность Аслаку Гринстеду (Aslak Grinsted), чей пакет программ (кросс-вейвлет анализ) был использован в данной диссертации.
- Автор выражает благодарность Г. Риллингу (G. Rilling), чья компьютерная программа по EMD-методу для пакета MATLAB была использована при получении части результатов, изложенных в данной диссертации.
- Автор выражает благодарность ряду исследователей за предоставление данных, необходимых для реализации исследования, но отсутствующих в общедоступных базах данных.
  - Автор благодарен Йагеру Хорсту (Jäger Horst) (Fraunhofer Institut für Atmosphärische Umweltforschung, Garmisch-Partenkirchen, Germany) за данные по оптическим свойствам аэрозоля.
  - Автор выражает благодарность Алану Робоку (Alan Robock) за предоставленные данные по вулканическому индексу *DVI* без учёта вариаций температуры воздуха вследствие вулканических извержений.

– Автор также приносит свою благодарность сотрудникам обсерваторий, чьи данные были использованы в данной диссертации.



## Литература

- [1] Алексеев В.А., *Некоторые особенности климатических изменений на Земле и возможная их связь с вариациями солнечной активности.* – *Астрономический Вестник*, Т.41, №6, Стр.568–576 (2007).
- [2] Астафьева Н. М., *Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения.* – *Успехи Физических Наук*, Т. 166, № 11, Стр. 1145–1170 (1996).
- [3] Вакуленко Н.В., Котляков В.М., Монин А.С., и Сонечкин Д.М., *О синхронности ледниковых циклов позднего Плейстоцена с колебаниями инсоляции на экваторе.* – *ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК (ГЕОГРАФИЯ)*, УДК 551.324, Том 413, №1, pp. 107–111 (2007).
- [4] Витязев В.В., *Вейвлет-анализ временных рядов.* – Учебное пособие. СПб.: Издательство Санкт-Петербургского Университета, 58 стр. (2001).
- [5] Вовк В.Я. и Егорова Л.В., *Роль солнечной активности в формировании аномального течения Эль-Ниньо.* – *Геомагнетизм и Аэрономия*, Т.47, №1, pp. 99–106 (2007).
- [6] Голицын Г.С. и Гинзбург А.С., *Оценки возможности “быстрого” метанового потепления 55 млн. лет назад.* – *ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК*, Том 413, №6, pp. 816–819 (2007).
- [7] Голицын Г.С., Мохов И.И., Акперов М.Г., и Бардин М.Ю., *Функции распределения вероятности циклонов и антициклонов в период 1952–2000гг.: инструмент для определения изменения глобального климата.* – *ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК*, Том 413, №2, pp. 254–256 (2007).

- [8] Давыдов А.В., *Цифровая обработка сигналов. Тема 1d: Аппроксимация сигналов и функций.* – Персональный сайт Давыдова А.В. (Уральский Государственный Горный Университет): <http://prodav.narod.ru/>, 13 стр. (2005).
- [9] Дымников В.П., Лыкосов В.Н., Воодин Е.М., Галин В.Я., Глазунов А.В., Грицун А.С., Дианский Н.А., Толстых М.А., и Чавро А.И., *Моделирование климата и его изменений.* – 138 стр., (стр. 36–173).
- [10] Зосимович, И. Д., *Геомагнитная активность и корпускулярная стабильность Солнца.* – Наука: Москва (1981).
- [11] Ипполитов И.И., Кабанов М.В., и Логинов С.В., *Пространственные и временные масштабы наблюдаемого потепления в Сибири.* – ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК, Том 412, №6, pp. 814–817 (2007).
- [12] Кершенгольц С.З., Баркова Е.С., и Плотников И.Я., *Зависимость геомагнитных возмущений от экстремальных значений  $E_y$ -компоненты солнечного ветра.* – Геомагнетизм и Аэрономия, Т.47, №2, pp. 167–175 (2007).
- [13] Кузнецов В.В., Чернева Н.В., и Дружин Г.И., *О влиянии циклонов на атмосферное электрическое поле Камчатки.* – ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК, Том 412, №4, pp. 547–551 (2007).
- [14] Миронова И.А., *Влияние солнечной активности на прозрачность атмосферы и оптические свойства аэрозоля.* Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. – Санкт-Петербург, 160 стр. (2005)
- [15] Монин А.С. и Сонечкин Д.М., *Колебания климата по данным наблюдений: тройной солнечный и другие циклы.* – 191 стр., М.: Наука (2005).
- [16] Морозова А.Л., Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. – Санкт-Петербург (1999)
- [17] Мохов И.И., Безверхний В.А., Елисеев А.В., Карпенко А.А., *Взаимосвязь изменений глобальной приповерхностной температуры с изменениями солнечной активности по данным*

- наблюдений и реконструкций для XVII-XX веков и по модельным расчетам.* – Доклады РАН, Т.409, №1, Стр.115–119 (2006).
- [18] Мохов И.И., Безверхний В.А., Елисеев А.В., Карпенко А.А., *Модельные оценки глобальных климатических изменений в XXI веке с учетом различных сценариев вариаций солнечной активности.* – Доклады РАН, Т.411, №2, Стр.250–253 (2006).
- [19] Наговицын Ю.А., *Глобальная активность Солнца на длительных временах.* – Астрофизический Вестник, Т.43, №1, Стр.45–58 (2008).
- [20] Огурцов М.Г., *Космогенные изотопы и их роль в современной палеоастрофизике Солнца.* – Геомагнетизм и Аэрономия, Т.47, №1, pp. 90–98 (2007).
- [21] Храмова М.Н., Красоткин С.А., и Кононович Э.В., *Прогнозирование солнечной активности методом фазовых средних.* – Электронный журнал «ИССЛЕДОВАНО В РОССИИ» (<http://zhurnal.ape.1169.relarn.ru/articles/2001/107.pdf>), стр. 1169–1176 (2001).
- [22] Юнгъ, *Солнце.* — 136 с. (в пер.).
- [23] Ярошевич М.И., *Динамика сезонных значений суммарных интенсивностей тропических циклонов.* – ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК, Том 413, №4, pp. 549–552 (2007).
- [24] *The ozone layer in the 21-st century.*
- [25] *Mediterranean Climate Variability Over The Last Centuries: A Review.*
- [26] Adams B.J., Mann M.E., and C.M. Ammann, *Proxy evidence for an El Niño-like response to volcanic forcing.* – Nature, V.426, pp. 274–278 (2003).
- [27] Allen M.R. and Smith L.A., *Investigating the origin and significance of low-frequency modes of climate variability.* – Geophysical Research Letters, V.21, No.10, pp. 883–886 (1994).

- [28] Ammann C.M., Joos F., Schimel D.S., Otto-Bliesner B.L., and Tomas R.A., *Solar influence on climate during the past millennium: Results from transient simulations with the NCAR Climate System Model.* – PNAS, V.104, No.10, pp. 3713–3718 (2007).
- [29] Ammann G.M. and Naveau Ph., *Statistical analysis of tropical explosive volcanism occurrences over the last 6 centuries.* – Geophysical Research Letters, V.30, No.5, pp. 1210–1213 (2003).
- [30] Angell J.K. and Korshover J., *Surface temperature changes following the six major volcanic episodes between 1780 and 1980.* – Journal of Climate and Applied Meteorology, V.24, pp. 937–951 (1985).
- [31] Baines P.G. and Folland Ch.K., *Evidence for a rapid global climate shift across the late 1960s.* – Journal of Climate, V.20, pp. 2721–2744 (2007).
- [32] Bard E. and Delaygue G., *Comment on “Are there connections between the Earth’s magnetic field and climate?” by V. Courtillot, Y. Gallet, J.-L. Le Mouél, F. Fluteau, A. Genevey EPSL 253, 328, 2007.* – Earth and Planetary Science Letters (Discussion), Vol. 265, Issues 1-2, pp. 302–307 (2008).
- [33] Bay R.C., Bramall N., and Buford Price P., *Bipolar correlation of volcanism with millennial climate change.* – PNAS, V.101, No.17, pp. 6341–6345 (2004).
- [34] Beckman J.E. and Mahoney T.J., *The Maunder Minimum and Climate Change: Have Historical Records Aided Current Research?* – Library and Information Services in Astronomy III, ASP Conference Series, Vol. 153, pp. 212–217 (1998), U. Grothkopf, H. Andernach, S. Stevens-Rayburn, and M. Gomez (eds.)
- [35] Beer J., *Solar variability and climate change.* – Mem. S.A.It., V.76, pp. 751–754 (2005).
- [36] Beer J., Mende W., Stellmacher R., *The role of the Sun in climate forcing.* – Quaternary Science Reviews, V.19, pp. 403–415 (2000).

- [37] Beer J., Vonmoos M., and Muscheler R., *Solar variability over the past several millennia.* – Space Science Reviews, V.125, pp. 67–79 (2006).
- [38] Benestad R. E., *Solar Activity and Earth's Climate.* – Second Edition, Springer-Praxis Publ. (2006).
- [39] Bertrand C., van Ypersele J.-P., and Berger A., *Volcanic and solar impacts on climate since 1700.* – Climate Dynamics, Vol.15, pp. 355–367 (1999).
- [40] Bhattacharya S. and Narasimha R., *Possible association between Indian monsoon rainfall and solar activity.* – Geophysical Research Letters, V.32, L05813 (2005).
- [41] Bochníček J. and Hejda P., *The winter NAO pattern changes in association with solar and geomagnetic activity.* – Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, V.67, pp.17–32 (2005).
- [42] Bojariu R. and Giorgi F., *The North Atlantic Oscillation signal in a regional climate simulation for the European region.* – Tellus, Vol. 57A, pp.1–13 (2005).
- [43] Bond G., Kromer B., Beer J., Muscheler R., Evans M.N., Showers W., Hoffmann Sh., Lotti-Bond R., Hajdas I., Bonani G., *Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene.* – Scienceexpress, 1065680, p.10.1126 (2001).
- [44] Bradley R., *Has solar forcing been an important influence on climate in the late Holocene?* – Presentation, 63p.
- [45] Bradley R.S., Hughes M.K., and Diaz H.F., *Climate in Medieval Time.* – Science, Vol. 32, pp. 404–405 (2003).
- [46] Bucha V., *Long-term trends in geomagnetic and climatic variability.* – Physics and Chemistry of the Earth, Vol.27, pp.427–431 (2002).
- [47] Burckle L. and Grissino-Maye H.D., *Stradivari, violins, tree rings and the Maunder minimum: a hypothesis.* – Dendrochronologia (Short article), Vol.21/1, pp.41–45 (2003).

- [48] Cadavid A.C., Lawrence J.K., and Ruzmaikin A., *Principal Components and Independent Component Analysis of Solar and Space Data.* – Solar Physics, doi 10.1007/s11207-007-9026-2 (2007).
- [49] Camp Ch.D. and Tung K.K., *Surface warming by the solar cycle as revealed by the composite mean difference projection.* – Geophysical Research Letters, V.34, L14703 (2007).
- [50] Casty C., *Climate variability over the North Atlantic/European and Alpine regions since 1500.* – PhD Thesis, Bern University, 2005.
- [51] Casty C., Raible Ch.C., Stocker Th. F., Wanner H., and Luterbacher J., *A European pattern climatology 1766-2000.* – Climate Dynamics, V.29, pp. 729–805 (2007).
- [52] Charbonneau P., *Dynamo models of the solar cycle.* – Living Rev. Solar Phys., **2**, (2005), 2.
- [53] Cliver E.W., Boriakoff V., and Feynman J., *Solar variability and climate change: Geomagnetic aa index and global surface temperature.* – Geophysical Research Letters, V.25, No.7, pp. 1035–1038 (1998).
- [54] Connolley W. and Steig E., *Moberg et al.: Highly variable Northern Hemisphere temperatures?* – RealClimate (<http://www.realclimate.org>) 15 February 2005.
- [55] Cook E.R., Esper J., D’Arrigo R.D., *Extra-tropical Northern Hemisphere land temperature variability over the past 1000 years.* – Quaternary Science Reviews, V.23, pp. 2063–2074 (2004).
- [56] Coughlin K. and Tung K.K., *Eleven-year solar cycle signal throughout the lower atmosphere.* – Journal of Geophysical Research, V.109, D21105 (2004).
- [57] Coughlin K. and Tung K.K., *11-Year solar cycle in the stratosphere extracted by the empirical mode decomposition method.* – Advances in Space Research, V.34, pp. 323–329 (2004).
- [58] Coughlin K. and Tung K.K., *Empirical Mode Decomposition of climate variability.* – Chapter 7, pp. 173–193 (2005).

- [59] Coughlin K. and Tung K.K., *Misleading patterns in correlation maps.* – Journal of Geophysical Research, V.111, D24102 (2006).
- [60] Courtillot V., Gallet Y., Le Mouél J.-L., Fluteau F., and Genevey A., *Are there connections between the Earth's magnetic field and climate?* – Earth and Planetary Science Letters, Vol. 253, pp. 328–339 (2007).
- [61] Courtillot V., Gallet Y., Le Mouél J.-L., Fluteau F., and Genevey A., *Response to comment on “Are there connections between Earth's magnetic field and climate? Earth Planet. Sci. Lett., 253, 328–339, 2007” by Bard, E., and Delaygue, M., Earth Planet. Sci. Lett., in press, 2007.* – Earth and Planetary Science Letters, Vol. 265, Issues 1-2, pp. 308–311 (2008).
- [62] Crowley Th., *Causes of Climate Change Over the Past 1000 Years.* – Science, V.289, pp. 270–277 (2000).
- [63] Cubasch U., Bürger G., Fast I., Spanghel Th., and Wagner S., *The direct solar influence on climate: modeling the lower atmosphere.* – Mem. S.A.It., Vol. 76, pp. 810–818 (2005).
- [64] Damon P.E. and Laut P., *Pattern of Strange Errors Plagues Solar Activity and Terrestrial Climate Data.* – Eos, Vol. 85, No. 39, 2004, pp.370,374.
- [65] Dawson Ch.W., See L.M., Abrahart R.J., Heppenstall A.J., *Symbiotic adaptive neuro-evolution applied to rainfall–runoff modelling in northern England.* – Neural Networks, Vol.19, pp.236–247 (2006).
- [66] Delmas R.J., Kirchner S., Palais J.M., and J.-R. Petit, *1000 years of explosive volcanism recorded at the South Pole.* – Tellus, Vol.44B, No.4, pp.335–350 (1992).
- [67] Dibike Y.B., Coulibaly P., *Temporal neural networks for downscaling climate variability and extremes.* – Neural Networks, Vol.19, pp.135–144 (2006).
- [68] Dima M. and Lohmann M., *A hemispheric mechanism for the Atlantic multidecadal oscillation.* – Journal of Climate, V.20, pp. 2706–2719 (2007).

- [69] Donarummo Jr. J., Ram M., Stolz M.R., *Sun/dust correlations and volcanic interference.* – Geophysical Research Letters, V.29, No.9, pp. 10.1029–10.1032 (2002).
- [70] Elsner J.B., *Granger causality and Atlantic hurricanes.* – Tellus, Vol.59A, No.4, pp.476–485 (2007).
- [71] Elsner J.B. and Kavlakov S.P., *Hurricane intensity changes associated with geomagnetic variation.* – Atmospheric Science Letters, doi:10.1006/asle.2001.0040 (2001).
- [72] Ermakov V., Okhlopkov V., and Stozhkov Yu., *Influence of Zodiac Dust on the Earth's Climate.*
- [73] El-Askary H., Sarkar S., Chiu L., Kafatos M., El-Ghazawi T., *Rain gauge derived precipitation variability over Virginia and its relation with the El Niño southern oscillation.* – Advances in Space Research, V.33, 338–342 (2004).
- [74] Evan A.T., Heidinger A.K., and Vimont D.J., *Arguments against a physical long-term trend in global ISCCP cloud amounts.* – Geophysical Research Letters, V.34, L04701 (2007).
- [75] Feliks Y. and Ghil M., *Long-term forecasting and the scientific background to Joseph's interpretation of pharaoh's dreams.* – Abstract.
- [76] Fischer E. M., Luterbacher J., Zorita E., Tett S. F. B., Casty C., and Wanner H., *European climate response to tropical volcanic eruptions over the last half millennium.* – Geophysical Research Letters, V.34, L05707 (2007).
- [77] Flandrin P., *Empirical Mode Decompositions as data-driven wavelet-like expansions for stochastic processes.*
- [78] Flandrin P., Gonçalves P. and Rilling G., *Detrending and denoising with Empirical Mode Decompositions.* – 4 p. (2004).
- [79] Fleer H.E., *Rainfall fluctuations and sunspot variability.* – Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology, Ser. B, Vol. 30, pp. 73–85 (1982).



- [80] Fodor I.K. and Kamath Ch., *Using independent component analysis to separate signals in climate data.*
- [81] Foukal P., Frönlich, Spruit H., and Wigley T.M.L., *Variations in solar luminosity and their effect on the Earth's climate.* – Nature, V.443, pp.161–166 (2006).
- [82] Friis-Christensen E, *Do solar variations affect our climate?* – Presentation (2001).
- [83] Friis-Christensen, E. and Lassen K., *Length of the solar cycle: An indicator of solar activity closely associated with climate.* – Science, V.254, pp.698–700 (1991).
- [84] Frick P., Galyagin D., Hoyt D.V., Nesme-Ribes E., Schatten K.H., Sokoloff D., and Zakharov V., *Wavelet analysis of solar activity recorded by sunspot groups.* – Astronomy and Astrophysics, V.328, pp. 670–681 (1997).
- [85] Gao Ch., Robock A., Self S., Witter J.B., Steffenson J.P., Clausen H.B., Siggaard-Andersen M.-L., Johnsen S., Mayewsky P.A., and Ammann G., *The 1452 or 1453 A.D. Kuwae eruption signal derived from multiple ice core records: Greatest volcanic sulfate event of the past 700 years.* – Journal of Geophysical Research, V.111, D12107 (2006).
- [86] Ge Z., *Significance tests for the wavelet power and the wavelet power spectrum.* – Annales Geophysicae, Vol. 25, pp. 2259–2269, (2007).
- [87] van Geel B., Raspopov O.M., Renssen H., van der Plicht J., Dergachev V.A., Majer H.A.J., *The role of solar forcing upon climate change.* – Quaternary Science Reviews, V.18, pp. 331–338 (1999).
- [88] Ghil M., *The Nile River Records Revisited: How good were Joseph's predictions?* – Presentation.
- [89] Giorgi F., *Climate change hot-spots.* – Geophysical Research Letters, V.33, L08707 (2006).

- [90] Granitto P.M. , Verdes P.F., and Ceccatto H. A., *Large-Scale Investigation of Weed Seed Identification by Machine Vision*. – Preprint submitted to Elsevier Preprint 25 June 2004.
- [91] Granitto P.M., Verdes P.F., Navone H.D., and Ceccatto H.A., *Artificial neural network learning on nonstationary behavior in time series*. – International Journal of Neural Systems, Vol. 11, No. 2, pp. 305–310 (2001).
- [92] Grinsted A., Moore J.C., and Jevrejeva S., *Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series*. – Nonlinear Processes in Geophysics, Vol. 11, pp. 561–566 (2004).
- [93] Haigh J.D., *The Sun and the Earth's climate*. – Living Rev. Solar Phys., **4**, (2007), 2.
- [94] Hansen J., Johnson D. , Lacis A., Lebedeff S., Lee P., Rind D., Russel G., *Climate Impact Of Increasing Atmospheric Carbon Dioxide*. – Science, V.213, No.4511, pp. 957–966 (1981).
- [95] Hansen J., Lebedeff S., *Global Trends Of Measured Surface Air Temperature*. – Journal of Geophysical Research, V.92, No.D11, pp. 13,345–13,372 (1987).
- [96] Hansen J., Ruedy R., Lo K., Glascoe J., & Sato M., *GISS analysis of surface temperature change*. – (1999).
- [97] Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., Kharecha, P., Lacis, A., Miller, R., Nazarenko, L., Lo, K., Schmidt, G. A., Russell, G., Aleinov, I., Bauer, S., Baum, E., Cairns, B., Canuto, V., Chandler, M., Cheng, Y., Cohen, A., Del Genio, A., Faluvegi, G., Fleming, E., Friend, A., Hall, T., Jackman, C., Jonas, J., Kelley, M., Kiang, N. Y., Koch, D., Labow, G., Lerner, J., Menon, S., Novakov, T., Oinas, V., Perlwitz, Ja., Perlwitz, Ju., Rind, D., Romanou, A., Schmunk, R., Shindell, D., Stone, P., Sun, S., Streets, D., Tausnev, N., Thresher, D., Unger, N., Yao, M., & Zhang, S., *Climate simulations for 1880–2003 with GISS modelE*, – Climate Dynamics, Vol.29, pp.661–696, doi:10.1007/s00382-007-0255-8 (2007).

- [98] Hansen J., Sato M., Ruedy R., Lo K., Lea D.W., and Medina-Elizade M., *Global temperature change.* – PNAS, V.103, No.39, pp. 14288–14293 (2006).
- [99] Hegerl G.C., Crowley T.J., Baum S.K., Kim K.-Y., Hyde W.T., *Detection of volcanic, solar and greenhouse gas signals in paleo-reconstructions of Northern Hemisphere temperature.* – Geophysical Research Letters, V.30, No.5, pp. 1242–1245 (2003).
- [100] Hoyt, D.V. and Schatten, K.H., *The role of the Sun in climate change.* – Oxford Univ. Press, New-York, (1997).
- [101] Hoyt D.V. and Schatten K.H., *Group sunspot numbers: a new solar activity reconstruction.* – Solar Physics, V.179, pp.189–219 (1998).
- [102] Hsieh W.W., Wu A., and Schabbar A., *Nonlinear atmospheric teleconnections.* – Submitted to Geophysical Research Letters.
- [103] Huang, N.E., Z. Shen, S.R. Long, M.C. Wu, H.H. Shih, Q. Zheng, N.-C. Yen, C.C. Tung, and H.H. Liu, *The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis,* Proceedings of the Royal Society of London, Ser. A, Vol. 454, pp. 903–995 (1998).
- [104] Ilin A., Valpola H., Oja E., *Exploratory analysis of climate data using source separation methods.* – Neural Networks, Vol.19, pp.155–167 (2006).
- [105] Jackman, C. H., Marsh, D. R., Vitt, F. M., Garcia, R. R., Fleming, E. L., Labow, G. J., Randall, C. E., López-Puertas, M., & Funke B., *Short- and medium-term atmospheric effects of very large solar proton events,* Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, Vol.7, 10543–10588 (2007).
- [106] Jäger H., *Long-term record of lidar observations of the stratospheric aerosol layer at Garmisch-Partenkirchen.* – Journal of Geophysical Research, V.110, D08106 (2005).
- [107] de Jager C. and Usoskin I., *On possible drivers of Sun-induced climate changes.* – Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, V.68, pp.2053–2060 (2006).

- [108] Javaraiah J., *North–south asymmetry in solar activity: predicting the amplitude of the next solar cycle.* – Mon. Not. R. Astron. Soc. 377, L34–L38 (2007).
- [109] Jevrejeva S., Grinsted A., and Moore J.C., *Nonlinear trends and multiyear cycles in sea level records.* – Geophysical Research Letters, V.111, C09012 (2006).
- [110] Jevrejeva S., Moore J.C., and Grinsted A., *Oceanic and atmospheric transport of multiyear El Niño–Southern Oscillation (ENSO) signatures to the polar regions.* – Geophysical Research Letters, V.31, L24210 (2004).
- [111] Jones P.D., *Land Surface Temperatures – Is The Network Good Enough?* – Climatic Change, V.31, pp.545–558 (1995).
- [112] Jones P.D., Mann M.E., *Climate over past millennia.* – Rev. Geophys, V.42, pp.1–42 (2004).
- [113] Jones P.D., Wigley T.M.L., Kelly P.M., *Variations in Surface Air Temperatures: Part 1. Northern Hemisphere, 1881–1980.* – Monthly Weather Review, V.59, No.2, pp. 59–70 (1982).
- [114] Kondrashov D., Feliks Y., and Ghil M., *Oscillatory modes of extended Nile River records (A.D. 622–1922).* – Geophysical Research Letters, V.32, L10702 (2005).
- [115] Kopecný M. and Kuklin G.V., *One possible explanation of Maunder’s minimum of sunspots.* – Bull. Astron. Inst. Czechosl., V.38, No.4, pp.193–200 (1987).
- [116] Kovaltsov G.A., Usoskin I.G., and Mursula K., *An upper limit on sunspot activity during the Maunder minimum.* – Solar Physics, V.224, pp.95–101 (2004).
- [117] Kravtsov S., Dewar W.K., Ghil M., McWilliams J.C., Berloff P., *A mechanistic model of mid-latitude decadal climate variability.* – Accepted to Physica D (2007).
- [118] Krivolutsky, A. A., Klyuchnikova, A. V., Zakharov, G. R., Vyushkova, T. Yu., Kuminov, A. A., *Dynamical response of the*

- middle atmosphere to solar proton event of July 2000: Three-dimensional model simulations* – Advances in Space Research, Vol. 37, Issue 8, pp.1602–1613 (2006).
- [119] Krivova N.A., Solanki S.K., and Beer J., *Was one sunspot cycle in the 18th century really lost?* – Astronomy & Astrophysics (Letter to the Editor), V.396, pp.235–242 (2002).
- [120] Kull D., *Connections Between Recent Water Level Drops in Lake Victoria, Dam Operations and Drought.* – (2006).
- [121] Labonte B., *Sky brightness measurements at Haleakala, 1955–2002.* – Solar Physics V.217, pp.367–381 (2003).
- [122] Lamb, H.H., *Volcanic dust in the atmosphere; with a chronology and assessment of its meteorological significance* – Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Vol. 266, pp. 425–533 (1970).
- [123] Lassen K. and Friis-Christensen E., *Variability of the solar cycle length during the past five centuries and the apparent association with terrestrial climate.* – J. Atmos. Terr. Phys., V.57, pp. 835–845 (1995).
- [124] Lassen K. and Friis-Christensen E., *Reply to “Solar cycle lengths and climate: A reference revisited” by P. Laut and J. Gundermann,* Journal of Geophysical Research, V.105, pp. 27,493–27,495 (2000).
- [125] Laut P., *Solar activity and terrestrial climate: an analysis of some purported correlations.* – Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, V.65, pp.801–812 (2003).
- [126] Lee H. and Smith A.K., *Simulation of the combined effects of solar cycle, quasi-biennial oscillation, and volcanic forcing on stratospheric ozone changes in recent decades.* – Journal of Geophysical Research, V.108, No. D2, 4049 (2003).
- [127] Legrand J.-P. and Simon P.A., *Solar cycle and geomagnetic activity: a review for geophysicists. I: The contributions to geomagnetic activity of shock waves and of the solar wind.* – Annales geophysicae. Atmospheres, hydrospheres and space sciences, V.7, No.6, pp. 565–578 (1989).

- [128] Leloup J.A., Lachkar Z. Boulanger J.-Ph. , and Thiria S., *Detecting decadal changes in ENSO using neural networks.* – Climate Dynamics, pp.147–162, doi 10.1007/s00382-006-0173-1 (2007).
- [129] Li K.J., Gao P.X., and Su T.W., *The Schwabe and Gleissberg periods in the Wolf sunspot numbers and the group sunspot numbers.* – Solar Physics, V.229, pp.181–198 (2005).
- [130] Link F., *La loi de Danjon et les eruptions volcaniques.* – The Moon, V.11, pp. 261–272 (1974).
- [131] Link F., *Sur l'activité solaire au 17ème siècle.* – Astronomy and Astrophysics, V.54, pp. 857–861 (1977).
- [132] Livadiotis G., Moussas X., *The sunspot as an autonomous dynamical system: A model for the growth and decay phases of sunspots.* – Physica A, V.379, pp. 436–458 (2007).
- [133] Lockwood M. and Frönlich C., *Recent oppositely directed trends in solar climate forcings and the global mean surface air temperature.* – Proceedings of the Royal Society A, V.463, pp. 2447–2460 (2007).
- [134] Lorenz E.N., *An attractor embedded in the atmosphere.* – Tellus, Vol. 58A, pp.425–429 (2006).
- [135] Lukianova R. and Alekseev G., *Long-term correlation between the NAO and Solar activity.* – Solar Physics, Vol. 224, pp.445–454 (2004).
- [136] Lundstedt H., *Solar activity modelled and forecasted: A new approach.* – Advances in Space Research, V.38, 862–867 (2006).
- [137] Lundstedt H., Liszka L., and Lun dinR., *Solar activity explored with new wavelet methods.* – Annales Geophysicae, Vol. 23, pp.1505–1511, (2005).
- [138] Mangini A., Verdes P., Spoötl C., Scholz D., Machele H., and Mahon S., *Combined records from a stalagmite from Barbados and from lake sediments in Haiti reveal variable seasonality in the Caribbean between 6.7 and 3 ka BP.* – Quaternary Science Reviews, V.26, pp. 1332–1343 (2007).

- [139] Mangini A., Spoötl C., and Verdes P., *Reconstruction of temperature in the Central Alps during the past 2000 yr from  $\delta^{18}\text{O}$  stalagmite record.* – Earth and Planetary Science Letters, V.34, pp. 741–751 (2005).
- [140] Mangini A., Verdes P., Spoötl C., Scholz D., Vollweiler N., and B. Kromer, *Persistent influence of the North Atlantic hydrography on central European winter temperature during the last 9000 years.* – Geophysical Research Letters, V.34, L02704 (2007).
- [141] Mann M.E., *Climate over the past two millennia.* – Annu.Rev.Earth Planet. Sci. 2007.35:111-136 (2007).
- [142] Mann M.E., Gille E., Bradley R.S., Hughes M.K., Overpeck J., Keimig F.T., and Gross W. , *Global Temperature Patterns in Past Centuries: An Interactive Presentation.* – Earth Interactions (<http://EarthInteractions.org>), Vol. 4, Paper No. 4, 29 p. (2000).
- [143] Mao J. and Robock A., *Surface Air Temperature Simulations by AMIP General Circulation Models: Volcanic and ENSO Signals and Systematic Errors.* – Journal of Climate, V.11, pp. 1538–1552 (1998).
- [144] Maraun D., *What Can We Learn from Climate Data? Methods for Fluctuation, Time/Scale and Phase Analysis.* – PhD Thesis, Potsdam University, 2006.
- [145] Maraun D. and Kurths J., *Cross wavelet analysis: significance testing and pitfalls.* – Nonlinear Processes in Geophysics, Vol. 11: pp.505–514 (2004).
- [146] Maraun D. and Kurths J., *Epochs of Phase Coherence between ENSO and Indian Monsoon.* – (2005).
- [147] Maraun D., Kurthz J., and Holschneider M. , *Nonstationary Gaussian processes in wavelet domain: Synthesis, estimation, and significance test.* – Physical Review E, Vol.75, 016707-01–016707-14 (2007).
- [148] Marsh N., Bondo T., *Sensitivity of tropospheric ionization to Forbush decreases, solar cycle modulation, and long-term trends.* – (2006).

- [149] Marsh N. and Svensmark H., *Cosmic rays, clouds and climate.* – Space Science Reviews, V.94, pp. 215–230 (2000).
- [150] Marsh N. D. and Svensmark H., *Low cloud properties influenced by cosmic rays.* – Physical Review Letters, V.85, No.23, pp. 5004–5007 (2000).
- [151] Mason B. G., Pyle D. M., Oppenheimer C., *The size and frequency of the largest explosive eruptions on Earth* – Bulletin of Volcanology, Vol. 66, No. 8, pp. 735–748 (2004).
- [152] Mass C. and Robock A., *The short-term influence of Mount St. Helens volcanic eruption on surface temperature in the Northwest United States.* – Monthly Weather Review, V.110, pp. 614–622 (1982).
- [153] P. N. Mayaud, J. Geophys. Res. 77, 6870 (1972).
- [154] McKeown M. J., Saab R., and Abu-Gharbieh R., *A Combined Independent Component Analysis (ICA)/ Empirical Mode Decomposition (EMD) Method to Infer Corticomuscular Coupling.* – Proceedings of the 2-nd International IEEE EMBS Conference on Neural Engineering, Arlington, Virginia, March 16 – 19, 2005, pp. 679–682 (2005).
- [155] Miksovsky J. and Raidl A., *Testing the performance of three nonlinear methods of time series analysis for prediction and downscaling of European daily temperatures.* – Nonlinear Processes in Geophysics, Vol.12, pp.979–991 (2005).
- [156] Miletsky E.V., Ivanov V.G., Nagovitsyn YU.A., and Jungner H., *Solar activity in the past: from different to combined reconstruction.* – Solar Physics, Vol. 224, pp.77–84 (2004).
- [157] Mironova I.A. and Pudovkin M.I., *Increase in the Aerosol Content of the Lower Atmosphere after the Solar Proton Flares in January and August 2002 according to Data of Lidar Observations in Europe.* – Geomagnetism and Aeronomy, Vol. 45, No. 2, 2005, pp. 221–226. Translated from Geomagnetizm i Aeronomiya, Vol. 45, No. 2, 2005, pp. 234–240.



- [158] Moberg A., Sonechkin D.M., Holmgren K., Datsenko N.M., & Karlén W., *Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data.* – Letters to Nature, V.433 (2005).
- [159] Mokhov I.I. and Smirnov D.A., *El Niño–Southern Oscillation drives North Atlantic Oscillation as revealed with nonlinear techniques from climatic indices* – Geophysical Research Letters, V.33, L03708 (2006).
- [160] Moore J.C., Grinsted A., and Jevrejeva S., *Is there evidence for sunspot forcing of climate at multi-year and decadal periods?* – Geophysical Research Letters, V.33, L17705 (2006).
- [161] Mordvinov A.V. and Kuklin G.V., *Hierarchy of cyclic solar activity changes.* – Solar Physics, V.187, pp.223–226 (1999).
- [162] Morgan F., *Colloquium: Soap bubble clusters.* – Reviews of Modern Physics, V.79, No.3, pp. 821–827, July–September 2007.
- [163] Mosedale T.J., Stephenson D.B., Collins M., and Mills T.C., *Granger Causality of Coupled Climate Processes: Ocean Feedback on the North Atlantic Oscillation.* – Journal of Climate – Special Section, V.19, pp. 1182–1194 (2005).
- [164] Mouradian Z., *Gleissberg cycle of solar activity.* – Proc. “SOLSPA: The Second Solar Cycle and Space Weather Euroconference”, Vico Equense, Italy, 24-29 September 2001 (ESA SP-477, February 2002).
- [165] Murphy J.O., *Annual reconstruction of the Solar cycle from atmospheric  $^{14}\text{C}$  variations.* – Aust. J. Phys., V.43, pp. 357–372 (1990).
- [166] Muscheler R., Joos F., Müller S. A., Snowball I. (Arising from: Solanki S.K., Usoskin I.G., Kromer B., Schüssler M., and Beer J. – Nature (V.431), 1084–1087 (2004)), *How unusual is today’s solar activity?* – Nature (Brief Communications Arising), V.436 (2005).
- [167] Newhall, Ch.G. and Self, S., *The volcanic explosivity index (VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism.* – Journal of Geophysical Research Vol. 87, No. C2, pp. 1231–1238 (1982).

- [168] Nordemann D.J.R., Rigozo N.R., and de Faria H.H., *Solar activity and El-Niño signals observed in Brazil and Chile tree ring records.* – *Advances in Space Research*, Vol. 35, pp. 891–896 (2005).
- [169] Ogurtsov M.G., *New evidence for long-term persistence in the Sun's activity.* – *Solar Physics* (2004).
- [170] Ogurtsov M.G., Jungner H., Kocharov G. E., Lindholm M., Eronen M. and Nagovitsyn Yu. A., *On the link between Northern Fennoscandian climate and length of the quasi-eleven-year cycle in galactic cosmic-ray flux.* – *Solar Physics*, Vol.218, pp. 345–357, (2003).
- [171] Oman L., Robock A., Stenchikov G.L., Schmidt G.A., and Ruedy R., *Climatic response to high-latitude volcanic eruptions.* – *Journal of Geophysical Research*, V.110, D13103 (2005).
- [172] Oman L., Robock A., Stenchikov G.L., and Thordarson Th., *High-latitude eruptions cast shadow over the African monsoon and the flow of the Nile.* – *Geophysical Research Letters*, V.33, L18711 (2006).
- [173] Oman L., Robock A., Stenchikov G.L., and Thordarson Th., Koch D., Shindell D.T., and Gao Ch., *Modelling the distribution of the volcanic aerosol cloud from the 1783–1784 Laki eruption.* – *Journal of Geophysical Research*, V.111, D12209 (2006).
- [174] Ortiz-Tánchez L.E., *Entropies and predictability of variability indices of the tropical Pacific.* – PhD Thesis, Humboldt University, Berlin, 2004.
- [175] Özgüç A., Ataç T., and Rybák J., *Evaluation of the short-term periodicities in the flare index between the years 1966–2002.* – *Solar Physics*, Vol.223, pp. 287–304 (2004).
- [176] Palmer T.N., *A Nonlinear Dynamical Perspective on Climate Prediction.* – *Journal of Climate*, pp. 575–591 (1999).
- [177] Panchev S. and Tsekov M., *Empirical evidences of persistence and dynamical chaos in solar-terrestrial phenomena.* – *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*, doi:10.1016/j.jastp.2007.07.011 (2007).

- [178] Paluš M. and Novotná D., *Common oscillatory modes in geomagnetic activity, NAO index and surface air temperature records.* – Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics, Vol.69, pp.2405–2415 (2007).
- [179] Pasotti J., *Daggers Are Drawn Over Revived Cosmic Ray–Climate Link.* – Science, Vol.319, p.144 (2008).
- [180] Patil D.J., Hunt B.R., Kalnay E., Yorke J.A., and Ott E., *Local Low Dimensionality of Atmospheric Dynamics.* – Physical Review Letters, V.86, No.26, pp. 5878–5871 (2001).
- [181] Pedro J., van Ommen T., Curran M., Morgan V., Smith A., McMorrow A., *Evidence for climate modulation of the  $^{10}\text{Be}$  solar activity proxy.* – Journal of Geophysical Research, V.111, D21105 (2006).
- [182] Peristykh A.N. and Damon P.E., *Persistence of the Gleissberg 88-year solar cycle over the last 12,000 years: Evidence from cosmogenic isotopes.* – Journal of Geophysical Research, V.108, A1, 1003 (2003).
- [183] Peterson Th.C., Karl Th.R., Jamason P.F., Knight R., Easterling D.R., *First difference method: Maximizing station density for the calculation of long-term global temperature change.* – Journal of Geophysical Research, V.103, No.D20 , pp. 25,967–25,974 (1998).
- [184] Pitari G. and Mancini E., *Short-term climatic impact of the 1991 volcanic eruption of Mt. Pinatubo and effects on atmospheric tracers.* – Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol. 2, pp. 91–108 (2002).
- [185] Ponyavin D.I., *Solar cycle signal in geomagnetic activity and climate.* – Solar Physics, Vol. 224, pp. 465–471 (2004).
- [186] Ponyavin D.I., Barliaeva T.V., and Zolotova N.V., *Hypersensitivity of climate response to solar activity output during the last 60 years,* Mem. S.A.It. Vol. 76, 1026 (2005).
- [187] Priest E.R., *Solar Magnetohydrodynamics.* – Dordrecht: Reidel (1987).

- [188] Eric R. Priest (Editor), Alan W. Hood (Editor), *Advances in Solar System Magnetohydrodynamics*.
- [189] Pudovkin, M. I., *Influence of solar activity on the lower atmosphere state* – International Journal of Geomagnetism and Aeronomy, Vol. 5, Issue 2, citeID GI2007, doi:10.1029/2003GI000060 (2004).
- [190] Pustil'nik L.A. and Dim G.Y., *Influence of Solar activity in the state of the wheat market in medieval England*. – Solar Physics, Vol. 223, pp. 335–356 (2004).
- [191] Quayle R.G., Peterson Th.C., Basist A.N., Godfrey C.S., *An operational near-real-time global temperature index*. – Geophysical Research Letters, Vol. 26, No.3, pp. 333–335 (1999).
- [192] Radić V., Pasarić Z., and Šinik N., *Analysis of Zagreb climatological data series using empirically decomposed intrinsic mode functions*. – Geofizika, V.21, pp. 15–36 (2004).
- [193] Raisbeck G.M. and Yiou F., *Comment on “Millenium scale sunspot number reconstruction: Evidence for an unusually active Sun since the 1940s?”* – Physical Review Letters, V.92, No.19, p.199001-1 (2004).
- [194] Ram M. and Stolz M.R., *Possible Solar influences on the dust profile of the GISP2 ice core from Central Greenland*. – Geophysical Research Letters, V.26, No.8, pp. 1043–1046 (1999).
- [195] Ram M. and Stolz M.R., *Correction to “Possible Solar influences on the dust profile of the GISP2 ice core from Central Greenland”*. – Geophysical Research Letters, V.26, No.12, p. 1763 (1999).
- [196] Ram M., Stolz M., and Koenig G. *Eleven year cycle of dust concentration variability observed in the dust profile of the GISP2 ice core from Central Greenland: Possible solar cycle connection*. – Geophysical Research Letters, V.24, No.19, pp. 2359–2362 (1997).
- [197] Raspopov O.M., Dergachev V.A., and Kolström T., *Hale cyclicity of Solar activity and its relation to climate variability*. – Solar Physics, Vol. 224, pp. 455–463 (2004).

- [198] Renssen H., van Geel B., van der Plicht J., Magny M., *Reduced solar activity as a trigger for the start of the Younger Dryas?* – Quaternary Science Reviews, V.68-71, pp. 373–383 (2000).
- [199] Reusch D.B., Alley R.B., and Hewitson B.C., *North Atlantic climate variability from a self-organizing map perspective.* – Journal of Geophysical Research, V.112, D602104 (2007).
- [200] Rigozo N.R., Nordemann D.J.R., Echer E., da Silva H.E., de Souza Echer M.P., Prestes A., *Solar and climate imprint differences in tree ring width from Brazil and Chile.* – Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol. 69, pp. 449–458, doi:10.1016/j.jastp.2006.10.013 (2007).
- [201] Rigozo N.R., Nordemann D.J.R., de Souza Echer M.P., Echer E., da Silva H.E., Prestes A., and Guarnieri F.L. *Solar activity imprints in tree ring width from Chile (1610–1991).* – Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol. 69, pp. 1049–1056 (2007).
- [202] Rigozo N.R., Nordemann D.J.R., Echer E., Zanandrea A., and Gonzalez W.D., *Solar variability effects studied by tree-ring data wavelet analysis.* – Advances in Space Research, Vol. 29, No. 12, pp. 1985–1988 (2002).
- [203] Rigozo N.R., Nordemann D.J.R., Pereira de Souza Echer M., Echer E., and Prestes A., *A studying of solar-ENSO correlation with southern Brazil tree-ring index (1955–1994).* – Climate of the Past Discussions,, V.1, pp. 215–230 (2005).
- [204] Rigozo N.R., Nordemann D.J.R., da Silva H.E., Pereira de Souza Echer M., Echer E., *Solar and climate signal records in tree ring width from Chile (AD 1587–1994).* – Planetary and Space Sciences, V.55, pp. 158–164 (2007).
- [205] Robock A., *Internally and externally caused climate change.* – Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 35, pp. 1111–1122 (1978).
- [206] Robock A., *Volcanic eruptions and climate.* – Reviews of Geophysics, V.38, No.2, pp. 191–219 (2000).

- [207] Robock A., *Volcanic eruptions*. – Volume 1 “The Earth system: physical and chemical dimensions of global environmental change”, pp. 738–744, edited by Dr. Michael C MacCracken and Dr. John S. Perry in “Encyclopedia of Global Environmental Change” (ISBN 0-471-97796-9), Editor-in-Chief Ted Munn, ©John Wiley & Sons, Ltd, Chichester (2002).
- [208] Robock A., *Cooling following large volcanic eruptions corrected for the effect of diffuse radiation on tree rings*. – Geophysical Research Letters, V.32, L06702 (2005).
- [209] Robock A. and Free M., *Ice cores as an index of global volcanism from 1850 to the present*. – Journal of Geophysical Research, V.100, D6, pp.11,549–11,567 (1995).
- [210] Robock A. and Mao J., *The volcanic signal in surface temperature observations*. – Journal of Climate, V.8, pp. 1086–1103 (1995).
- [211] Rusov V.D., Glushkov A.V., Vaschenko V.N., Pavlovich V.N., Zelentsova T.N., Mihalus O.T., Tarasov V.A., Saranuk D.N., *Cosmic rays and solar insolation as the main control parameters of the catastrophe theory of climatic response to orbital variations*.
- [212] Rust B. W., *Carbon Dioxide, Global Warming, and Michael Crichton’s “State of Fear”*. – Computing Science and Statistics, Vol. 37 (2006).
- [213] Ruzmaikin A., Feynman J., and Yung Y.L., *Is solar variability reflected in the Nile river?* – Journal of Geophysical Research, V.111, D21114 (2006).
- [214] Sato, M., Hansen J.E., McCormick M.P., and Pollack J.B., *Stratospheric aerosol optical depth, 1850-1990*. – Journal of Geophysical Research, V.98, pp.22987–22994 (1993).
- [215] Scafetta N. and West B.J., *Phenological solar signature in 400 years of reconstructed Northern Hemisphere temperature record*. – Geophysical Research Letters, V.33, L17718 (2006).
- [216] Scafetta N. and West B.J., *Phenomenological reconstructions of the solar signature in the Northern Hemisphere surface temperature records since 1600*. – Journal of Geophysical Research, Vol. 112, D24S03 (2007).

- [217] Schatzmann J., *Using Self-Organizing Maps to Visualize Clusters and Trends in Multidimensional Datasets*. – Final year individual project report, Imperial College, London, 132p. (2003).
- [218] Schlesinger E. and Ramankutty N., *An oscillation in the global climate system of period 65–70 years*. – Nature (Letters to Nature), Vol. 367, pp. 723–726 (1994).
- [219] Schove D.J., *Sunspot turning-points and aurorae since A.D.1510*. – Solar Physics, V.63, pp.423–432 (1979).
- [220] Self S. *The effects and consequences of very large explosive volcanic eruptions*. – Philosophical Transactions of the Royal Society A, Vol. 364, pp. 2073–2097 (2006).
- [221] Sello S. *Wavelet entropy as a measure of solar cycle complexity*. – Astronomy and Astrophysics, Vol. 363, pp. 311–315 (2000).
- [222] Sello S. *Wavelet entropy and the multi-peaked structure of solar cycle maximum*. – New Astronomy, Vol.8, pp.105–117 (2003).
- [223] Shindell D.T., Schmidt G.A., Miller R.L., and Mann M.E. *Volcanic and Solar Forcing of Climate Change during the Preindustrial Era*. – Journal of Climate, V.16, pp. 4094–4107 (2003).
- [224] Shiogama H., Nagashima T., Yokohata T., Crooks S.A., and Nozawa T., *Influence of volcanic activity and changes in solar irradiance on surface air temperatures in the early twentieth century*. – Geophysical Research Letters, V.33, L09702 (2006).
- [225] de Silva Sh.L., *Volcanic eruptions and their impact on the earth's climate*. – Encyc. of Climate, pp. 12.
- [226] Simon P.A. and Legrand J.-P., *Solar cycle and geomagnetic activity: a review for geophysicists. II: The solar sources of geomagnetic activity and their links with sunspot cycle activity*. – Annales geophysicae. Atmospheres, hydrospheres and space sciences, V.7, No.6, pp. 579–593 (1989).
- [227] Solanki S.K., Usoskin I.G., Kromer B., Schüssler M., and Beer J., *Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years*. – Nature (Letters to Nature), V.431, 1084–1087 (2004).

- [228] Solanki et al. reply, *Reply to R.Muscheler et al.* doi:10.1038/nature04045(2005) – Nature (Brief Communications Arising), V.436 (2005).
- [229] Solé J., Turiel A., Llebot J.E., *Classification of Dansgaard-Oeschger climatic cycles by the application of similitude signal processing.* – Physical Letters A, V.366, pp. 184–189 (2007).
- [230] Solé J., Turiel A., Llebot J.E., *Using empirical mode decomposition to correlate paleoclimatic time-series.* – Natural Hazards and Earth System Sciences, V.7, pp. 299–307 (2007).
- [231] Soon W., Baliunas S., Idso C., Idso Sh., and Legates D.R., *Reconstructing climatic and environmental changes of the past 1000 years: a reappraisal.* – A preprint for Energy & Environment, 79p. (2003).
- [232] Spak, S., Holloway T., Lynn B., and Goldberg R., *A comparison of statistical and dynamical downscaling for surface temperature in North America* – Journal of Geophysical Research, Vol.112, D08101, doi:10.1029/2005JD006712 (2007).
- [233] Stager J.C., Ryves D., Cumming B.F., David Meeker L., and Beer J., *Solar variability and the levels of Lake Victoria, East Africa, during the last millenium.* – J. Paleolimnol, Vol. 33, pp. 243–251 (2005).
- [234] Stager J.C., Ruzmaikin A., Conway D., Verburg P., and Mason P.J., *Sunspots, El Niño, and the levels of Lake Victoria, East Africa.* – Journal of Geophysical Research, V.112, D15106 (2007).
- [235] Střeščík J., *Possible correlation between solar and volcanic activity in a long-term scale.* – Proc. ISCS 2003 Symposium, 'Solar Variability as an Input to the Earth's Environment', Tatranská Lomnika, Slovakia, 23-28 June 2003 (ESA SP-535, September 2003).
- [236] Svensmark H., *Influence of cosmic rays on Earth's climate.* – Physical Review Letters, V.81, No.22, pp. 5027–5030 (1998).
- [237] Svensmark H., *Cosmoclimatology: a new theory emerges.* – A&G, Vol.48, pp. 1.18–1.24 (2007).



- [238] Svensmark H. and Friis-Christensen E., *Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage – a missing link in solar-climate relationships* – J.Atmos. Solar-Terr.Phys., Vol.59, pp. 1225–1232 (1997).
- [239] Terradas J, Oliver R., and Ballester J.L., *Application of statistical techniques to the analysis of Solar coronal oscillations.* – The Astrophysical Journal, V.614, pp. 435–447 (2004).
- [240] Tessonne C.J., Mirasso C.R., Toral R., and Gunton J.D. , *Diversity-Induced Resonance.* – Physical Review Letters, Vol.97, 194101 (2006).
- [241] Thejll P.A., *Decadal power in land air temperatures: Is it statistically significant?* – Journal of Geophysical Research, V.106, No. D23, pp. 31,693–31,702 (2001).
- [242] Tinsley, B. A., *Influence of solar wind on the global electric circuit, and inferred effects on cloud microphysics, temperature, and dynamics in the troposphere* – Space Science Reviews, 94, No. 1-2, pp. 231–258 (2000).
- [243] Torrence Ch. and Compo G.P., *A Practical Guide to Wavelet Analysis.* – Bulletin of the American Meteorological Society, V.79, No. 1, pp. 61–78 (1998).
- [244] Torrence Ch. and Webster P.J., *Interdecadal Changes in the ENSO–Monsoon System.* – Journal of Climate, V.12, pp. 2679–2690 (1999).
- [245] Tsonis A.A., *Probing the linearity and nonlinearity in the transitions of the atmospheric circulation.* – Nonlinear Processes in Geophysics, Vol.8, pp.341–345 (2001).
- [246] Tsonis A.A., Elsner J.B., Hunt A.G., and Jagger T.H., *Global Temperature Tendency and El Nino Frequency.* – 14p. (2005).
- [247] Tsonis A.A. and Georgakalos K.P., *Observing extreme events in incomplete state spaces with application to rainfall estimation from satellite images.* – Nonlinear Processes in Geophysics, Vol.12, pp.195–200 (2005).

- [248] Tsonis A.A., Swanson K., and Kravtsov S., *A new dynamical mechanism for major climate shifts.* – Geophysical Research Letters, V.34, L13705 (2007).
- [249] Tung K.-K. and Camp Ch.D., *Solar-Cycle Warming at the Earth's Surface and an Observational Determination of Climate Sensibility.* – Journal of Geophysical Research, 32p.
- [250] Turhan (Tury) Taner M., *Kohonen's self organizing networks with "conscience".* – Kohonen's Self Organizing Maps and Their Use in Interpretation, 7p. (1997)
- [251] Usoskin I.G. and Kromer B., *Reconstruction of the  $^{14}\text{C}$  production rate from measured relative abundance.* – Radiocarbon, Vol. 47, No. 1, pp.31–37 (2005).
- [252] Usoskin I.G. and Mursula K., *Long-term solar cycle evolution: review of recent developments.* – Solar Physics, V.218, pp.319–343 (2003).
- [253] Usoskin I.G. and Mursula K., and Kovaltsov G.A., *Reconstruction of monthly and yearly group sunspot numbers from sparse daily observations.* – Solar Physics, V.218, pp.295–305 (2003).
- [254] Usoskin I.G., Solanki S.K., Kovaltsov G.A., Beer J., Kromer B., *Solar proton events in cosmogenic isotope data.* – Geophysical Research Letters, V.33, L08107 (2006).
- [255] Usoskin I.G., Solanki S.K., and Schüssler M., Mursula K. and Alanko K., *Millennium-scale sunspot number reconstruction: evidence for an unusually active Sun since the 1940s.* – Physical Review Letters, V.91, No.21, 211101(4) (2003).
- [256] Usoskin I.G., Solanki S.K., Taricco C., Bhandari N., and Kovaltsov G.A., *Long-term solar activity reconstructions: direct test by cosmogenic  $^{44}\text{Ti}$  in meteorites.* – Astronomy & Astrophysics, V.457, L25–L28 (2006).
- [257] Usoskin I.G., Voiculescu M., Kovaltsov G.A., and Mursula K., *Correlation between clouds at different altitudes and solar activity: Fact or Artifact?* – Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol.68, pp.2164–2172 (2006).

- [258] Vatchev V., *The analysis of the Empirical Mode Decomposition Method.* – 24 p. (2002).
- [259] Verdes P.F., *Global Warming is driven by anthropogenic emissions: a timeseries analysis approach.* – Physical Review Letters, PRL 99, 048501 (2007).
- [260] Verdes P.F., Granitto P.M., and Ceccatto H.A., *Secular behaviour of Solar magnetic activity: nonstationary time-series analysis of the sunspot record.* – Kluwer Academic Publishers, 11p. (2004).
- [261] Veretenenko S.V., Dergachev V.A., and Dmitriyev P.B., *Long-term variations of the surface pressure in the North Atlantic and possible association with solar activity and galactic cosmic rays.* – Advances in Space Research Vol. 35, pp. 484–490 (2005).
- [262] Veretenenko S.V. and Thejll , *Effects of energetic solar proton events on the cyclone development in the North Atlantic.* – Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics Vol. 66, pp. 393–405 (2004).
- [263] Veretenenko S.V. and Thejll, *Cyclone regeneration in the North Atlantic intensified by energetic solar proton events.* – Advances in Space Research Vol. 35, pp. 470–475 (2005).
- [264] Voiculescu M., Usoskin Ilya G., and Mursula K., *Different response of clouds to solar input.* – Geophysical Research Letters, Vol. 33, L21802, doi:10.1029/2006GL027820 (2006).
- [265] Wagner S. and Zorita E., *The influence of volcanic, solar and CO<sub>2</sub> forcing on the temperatures in the Dalton Minimum (1790-1830): a model study.* – Climate Dynamics V.25, pp.205–218 (2005).
- [266] Weber S.L., *A timescale analysis of the Northern Hemisphere temperature response to volcanic and solar forcing.* – Climate of the Past, Vol. 1, pp. 9–17 (2005).
- [267] Weng H., *The influence of the 11 yr solar cycle on the interannual–centennial climate variability.* – Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol. 67, pp. 793–805 (2005).

- [268] Wittmann A.D. and Xu Z.T., *A catalogue of sunspot observations from 165 BC to AD 1684*. – Astronomy & Astrophysics Supplement Series, Vol. 70, pp. 83–94 (1987).
- [269] Wu A., Hsieh W.W., Tang B., *Neural network forecasts of the tropical Pacific sea surface temperatures*. – Neural Networks, Vol.19, pp. 145–154 (2006).
- [270] Yang Zh., Qi D. and Yang L., *Signal Period Analysis Based on Hilbert-Huang Transform and Its Application to Texture Analysis*. – 12 p. (2004).
- [271] Yoshimori, M., Stocker T. F., Raible C. C., and Renold M., *Externally-forced and internal variability in ensemble climate simulations of the Maunder Minimum*. – Journal of Climate, Vol. 18, pp. 4253–4270 (2005).
- [272] Yousef Sh.M., Amer M., and Abdel Aty M., *The sharp rise of lake Victoria, a positive indicator to Solar Wolf-Gleissberg cycles turning points*. – ICEHM2000, Cairo University, Egypt, September, 2000, pp. 222–234.
- [273] Zielinski G.A., *Stratospheric loading and optical depth estimates of explosive volcanism over the last 2100 years derived from the Greenland Ice Sheet Project 2 ice core*. – Journal of Geophysical Research, V.100, No. D10, pp. 20,937–20,955 (1995).
- [274] Zolotova N.V. and Ponyavin D.I., *Was the unusual solar cycle at the end of the XVIII century a result of phase asynchronization?* – Astronomy & Astrophysics (Letter to the Editor), V.470, L17–L20 (2007).