Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук»

На правах рукописи

СКАКУН Александра Андреевна

ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ИНСОЛЯЦИИ НА ЗЕМНОЙ КЛИМАТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОДХОДА НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ

специальность: 01.03.03 - физика Солнца

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель

к.ф.-м.н., с.н.с. Волобуев Д.М.

Санкт-Петербург

2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ИНСОЛЯЦИЯ И ЕЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ	20
1.1 Определение инсоляции. Орбитальная и солнечная составляющие	20
1.1.1 Формула суточной инсоляции как основа расчета	21
1.1.2 Различные способы расчета орбитально-обусловленной инсоляции	по
временному и пространственному признаку	23
1.2 Орбитальная составляющая и факторы, влияющие на точность и	
длительность ее расчета	24
1.2.1 Прецессия, Наклонение орбиты и эксцентриситет – параметры рас	чета
инсоляции	24
1.2.2 Ограничения длительности расчета инсоляции в связи с нелинейно	ой
природой и неучтенные физические факторы	25
1.3 Составляющая инсоляции, обусловленная солнечной активностью.	
Современные наблюдения и реконструкции в Голоцене	25
1.3.1 История эмпирических наблюдений TSI	26
1.3.2 Различные абсолютные значения TSI: VIRGO scales	28
1.3.3 Композитные кривые современных наблюдений TSI	29
1.3.4 Связь TSI и других прокси солнечной активности	29
1.4 Оценка влияния орбитальной и солнечной составляющих на примере	
реконструкции TSI за период Голоцена	31
1.4.1 Влияние различных орбитальных решений на расчет инсоляции в	
Голоцене	33
1.4.2 Интегральная годовая инсоляция: методика расчета	34

1.4.3 Широтные градиенты интегральной годовой инсоляции		
1.4.4 Интегральная годовая инсоляция по всей сфере	36	
1.5 Выводы к главе 1	37	
ГЛАВА 2. МЕТОД УСЛОВНЫХ ДИСПЕРСИЙ И ЕГО АПРОБАЦИЯ	39	
2.1. Начальные предположения	39	
2.2 Описание метода	40	
2.3 Алгоритм диагностики связи	41	
2.3.1 Подготовка входных данных	41	
2.3.2 Реконструкция Такенса или отображение запаздывающих координат	r 42	
2.3.3 Оценка корреляционной размерности рядов	44	
2.3.4 Расчет условной дисперсии для фазовых траекторий	47	
2.3.5 Анализ результата на графике зависимости $\sigma(\varepsilon)$	48	
2.4 Оценка ошибки методом Монте-Карло	49	
2.5 Выводы к главе 2	51	
ГЛАВА З. ВЛИЯНИЕ ИНСОЛЯЦИИ НА КЛИМАТ НА КОРОТКИХ		
ВРЕМЕННЫХ МАСШТАБАХ	52	
3.1 Примеры обнаруженного соответствия между инсоляцией и		
климатическими рядами на коротких временных масштабах	52	
3.2 Оценка влияния инсоляции на климатические индексы океана с помощы	0	
метода условных дисперсий	53	
3.2.1 Рассматриваемые климатические индексы	53	
3.2.2 Оценка погрешности временных рядов	57	
3.2.3 Концептуальная модель взаимодействия океана и атмосферы	59	
3.2.4 Расчет MCD для TSI и климатических индексов	60	
3.3 Выводы к главе 3	63	

ГЛАВА 4. ПРОГНОЗ ДЕКАДНЫХ СРЕДНИХ TSI В ПЕРИОД 25-ГО			
СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА	64		
4.1 Метод аналогов Лоренца	65		
4.1.1 Описание алгоритма метода	66		
4.2 Однородность реконструкций и качество прогноза			
4.2.1 Реконструкции, их источники и масштабирование, выполнение			
прогноза для нескольких реконструкций на тестовых выборках	68		
4.2.2 Оценка точности прогноза	71		
4.2.3 Выбор однородной реконструкции для прогноза	74		
4.3 Прогноз выбранной реконструкции	78		
4.4 Сравнение разных прогнозов	80		
4.5 Выводы к главе 4	82		
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	83		
ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ СОКРАЩЕНИЯ	85		
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	86		

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа посвящена анализу влияния инсоляции на изменения климата на различных временных масштабах (порядка десятков, сотен и десятков тысяч лет) в рамках концепции нелинейной хаотической динамики.

Актуальность темы. Вопросы, связанные с изменением климата, в последнее время вызывают большой интерес у самой широкой аудитории. Им посвящены крупные международные съезды политиков, на которых обсуждают антропогенную нагрузку на климат и ее последствия, и по итогам которых заключаются соглашения о снижении содержания углекислого газа в атмосфере. В их число входят Киотский протокол (1997 г.), Парижское соглашение (2015 г.). Многие специалисты полагают, что современное глобальное потепление климата Земли вызвано накоплением техногенных парниковых газов в атмосфере. промышленными Следовательно, разумное управление выбросами может предотвратить дальнейший рост температуры и обеспечить приемлемые условия для существования следующих поколений (Шестой оценочный доклад IPCC). С другой стороны, в число факторов, влияющих на земной климат, также входит и форсинг, обусловленный солнечным излучением. Основным инструментом такого форсинга являются вариации солнечной инсоляции. Она определяется солнечной постоянной (Total Solar Irradiance, TSI) и параметрами орбиты Земли, зависящими от времени.

Следует ожидать, что прямые свидетельства гелиообусловленности климатических вариаций должны содержаться в измеряемых характеристиках атмосферных, наземных и океанических процессов. Но, как нам известно благодаря спутниковым наблюдениям, вариации TSI малы по сравнению со своим средним значением 1365 Вт м⁻², а вариации параметров орбиты Земли имеют очень большие периоды (23, 46, 100 тыс. лет). Таким образом, предполагая наличие солнечного управляющего сигнала в климатических процессах, мы также предполагаем наличие механизмов усиления этого сигнала. Подобные нелинейные механизмы усиления влияния TSI могут существовать как в приполярных

областях Земли (Volobuev, 2014), так и в тропических атмосфере и океане (White and Liu, 2008).

В целом, роли солнечной активности в климате уделяется большое внимание исследователей в последние годы (Gray et al., 2010; Dergachev and Losev, 2021; Lin et al., 2021). Сама идея о солнечно-земных связях высказывалась еще в 30-х годах 20 века А.Л. Чижевским и в дальнейшем получила свое развитие на основе наличия корреляции между рядами солнечной активности и различными климатическими рядами, например, рядами температуры океана (Reid, 2000).

Чаще всего, рассмотренные в таких работах временные ряды относятся к временным шкалам, превышающих шкалу инструментальных измерений. Обычно речь идет о палеореконструкциях, полученных на основе косвенных (proxy) данных. Способы получения таких реконструкций основаны на весьма деликатных процедурах, которые не всегда можно обосновать, или хотя бы воспроизвести независимым способом. Эти обстоятельства вызывают скепсис по отношению к оценкам взаимных корреляций солнечных и климатических палеорядов. Например, при датировании известного палеоклиматического ряда температуры океана LR04 (Lisiecki and Raymo, 2005) была использована кривая инсоляции, что может приводить к наличию корреляции между этими рядами.

Ho коэффициент корреляции Пирсона по себе не сам является свидетельством наличия или отсутствия причинной связи между рядами, тем более, в такой сложной и комплексной нелинейной системе, как климат. Можно предположить, что традиционные линейные методы корреляционного анализа, основанные на Пирсоновской статистике, не способны выявить слабый солнечный сигнал из климатических данных, отягощенных собственным динамическим и антропогенным шумами. Поэтому, в данной диссертации для диагностики причинных солнечно-земных связей использованы численные методы хаотической динамики. Формальным контекстом служит известный сценарий обобщенной синхронизации (Abarbanel et al., 1996), в котором предполагается самая общая функциональная связь между двумя системами.

В настоящей диссертационной работе численно и теоретически анализируется влияние инсоляции на изменения климата, что, представляя собой сложную комплексную и во многом нерешенную проблему, и определяет актуальность выполненного диссертационного исследования.

Целью настоящей работы является теоретический анализ влияния двух составляющих инсоляции – (1) орбитальной и (2) обусловленной солнечной активностью - на изменения климата на разных временных масштабах: десятки тысяч, сотни, десятки лет. В частности, предполагалось сравнить вклады этих двух составляющих в инсоляцию на протяжении Голоцена (11 тыс. лет), провести анализ причинной связи между временными рядами основных климатических индексов океана: Северо-Атлантического Колебания (NAO), Эль-Ниньо (NINO 3.4), Тихоокеанского Декадного Колебания (PDO) и солнечной постоянной (TSI) на протяжении последних 120 лет, а также реализовать прогноз декадных средних TSI на 25-й солнечный цикл.

Цель достигалась решением следующих задач:

1. Сравнение известных способов расчета инсоляции и выбор оптимального орбитального решения.

2. Сравнение вкладов орбитально обусловленной и обусловленной солнечной активностью составляющих в годовую инсоляцию на протяжении Голоцена (11 тыс. лет) в зависимости от широты.

3. Калибровка метода условных дисперсий – одного из нелинейных методов диагностики причинной связи – на концептуальной модели взаимодействия Океан-Атмосфера. Оценка качества работы этого метода в присутствии искусственно наведенного Гауссового шума в модельном временном ряде.

4. Анализ причинных связей между временными рядами климатических индексов океана NAO, NINO 3.4, PDO и солнечной постоянной TSI на протяжении последних 120 лет с помощью откалиброванного выше метода условных дисперсий с учетом зашумленности эмпирических временных рядов.

5. Тестирование качества реконструкций солнечной постоянной TSI в Голоцене, полученных разными авторами из различных наборов косвенных данных. Разработка критерия, основанного на точности нелинейного прогноза.

6. Прогноз декадных средних реконструкции TSI в Голоцене на 25-й солнечный цикл с помощью модифицированного метода аналогов Лоренца.

Методы исследования

В настоящей работе использовались следующие численные методы:

1. Метод условных дисперсий для диагностики причинных связей, реализованный в среде Matlab;

2. Модифицированный метод аналогов Лоренца для оценки качества реконструкций TSI и прогноза временного ряда TSI, реализованный в среде Matlab;

3. Метод Монте-Карло для анализа влияния шума в данных на оценки, полученные методом условных дисперсий;

4. Методы классической статистики и теории вероятностей;

5. Методы хаотической динамики.

Научная новизна

• Впервые произведено сравнение вкладов орбитально обусловленной и обусловленной солнечной активностью компонент в широтно-зависимую инсоляцию за время Голоцена.

• С помощью анализа направления причинной связи между временными рядами методом условных дисперсий подтверждено влияние TSI на климатические индексы.

• Предложен количественный критерий для однородности реконструкции, основанный на точности её прогноза модифицированным методом аналогов.

• Произведен прогноз декадных средних TSI методом аналогов на 25-й солнечный цикл, на основании которого можно утверждать, что сценарий будущих изменений TSI, соответствующих грандиозному минимуму, не подтверждается.

Теоретическая и практическая значимость

Проведенная работа позволила предложить ряд методик для улучшения существующих прогностических климатических моделей. Улучшенные варианты позволяют получать прогнозы глобальных изменений климата для различных сценариев. Одним из важных компонентов каждой такой модели является форсинг (внешняя воздействующая сила) в виде инсоляции. Величина воздействия конкретного форсинга на определенную климатическую переменную (это, по сути, множитель при форсинге в модельной переменной) все еще является предметом дискуссии, так как в число возможных форсингов климатической системы, помимо антропогенного, входят также природные факторы (солнечная и вулканическая активность, содержание водяных паров в атмосфере и т.д.). Предполагается, что значимость форсинга, в нашем случае вариаций инсоляции, может меняться в зависимости от рассматриваемого временного масштаба. Например, по одной из теорий, причиной среднеплейстоценового перехода (Mid Pleistocene Transition, 1.2 млн лет назад, когда 40-тысячелетняя периодичность 100-тысячелетней) оледенений сменилась являлись вариации инсоляции, обусловленные орбитальной составляющей.

На данный момент общество уже столкнулось с глобальными изменениями климата и острой необходимостью действовать, исходя из реалистичных будущих изменений климата. Построение прогнозов возможных таких прогностических моделей возможно только при наличии глубокого понимания физики процессов в климате, формирующемся при изучении уже известных палеорядов, а также инструментов для улучшения качества существующих моделей. В данной работе предлагается использовать нелинейный метод определения наличия причинной связи между временными рядами - метод условных дисперсий - как средство, позволяющее оценить причинные связи между эмпирическими рядами и соотнести полученные результаты с модельными рядами. Таким образом, в распоряжении моделистов окажется еще один инструмент улучшения качества моделей. Как следствие, исследователи смогут

получать более точные прогнозы будущих изменений климата и разработать адекватный ответ на них.

Также в этой работе предложено использовать предсказуемость климатических временных рядов методом аналогов Лоренца в качестве критерия качества реконструкции, это было успешно продемонстрировано на нескольких известных реконструкциях солнечной постоянной.

Полученный в этой работе прогноз солнечной постоянной в 25-м солнечном цикле опровергает предположения о том, что в ближайшее время наступит гранд-минимум солнечной активности, что также позволяет исследователям уточнить прогнозы.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Получены оценки изменений инсоляции в Голоцене с учетом параметров орбиты Земли и изменений солнечной постоянной (TSI), обусловленных солнечной активностью.

2. Установлена причинная связь между TSI и климатическими индексами NINO 3.4 и PDO на масштабе 100 лет методом условных дисперсий.

3. Разработан новый подход для тестирования качества реконструкций TSI в Голоцене, основанный на методе нелинейного прогноза. Прогноз не подтвердил сценарий, по которому в ближайшее десятилетие начнется гранд-минимум.

Личный вклад автора заключается в участии в постановке задач, в применении численных методов нелинейной хаотической динамики К климатическим временным рядам, а также в адаптации имеющихся временных рядов ДЛЯ численных расчетов: интерполяции, фильтрации, сшивании, сглаживании и нормировке. Все математические выкладки и численные расчёты, представленные в диссертации, были проведены непосредственно автором. Анализ теоретических моделей, использованных для верификации методов нелинейной динамики, преимущественно выполнен автором диссертации.

Достоверность изложенных в диссертации моделей подтверждается тем, что они основаны на строгих результатах хаотической динамики. Справедливость численных оценок проверяется статистическим сравнением со случайными аналогами, полученными методом Монте-Карло. Частные результаты численного моделирования предложенных моделей совпадают с известными эмпирическими данными.

Апробация

Результаты были 6 конференциях диссертации доложены на международного и всероссийского уровня, включая: 1) Пулковская молодежная конференция-2016, СПб, Скакун А.А., Волобуев Д.М. «Методы определения причинно-следственных связей» http://younggao.ru/; 2) 11я международная школа «Хаотические автоколебания и образование структур», Саратов, 2016, Скакун А.А., Волобуев Д.М. «Определение направления причинно-следственных связей в динамических системах: приложение к палеоклимату» ; 3) XX всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика-2016», СПб, Скакун А. А., Волобуев Д.М. «Вклад вариаций солнечной постоянной в расчеты инсоляции во время Голоцена»; 4) XXI всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика-2017», СПб, Скакун А.А., Волобуев Д.М. «Проблемы прогнозирования огибающей солнечных циклов в терминах TSI методом аналогов»; 5) 32nd IUGG Conference on Mathematical Geophysics, Nizhny Novgorod, Russia, 2018, Skakun A., Volobuev D. "A causal link between TSI and climate oscillation indices during last century"; 6) Нелинейные волны-2018, Нижний Новгород, Скакун А.А., Волобуев Д.М., Вербицкий М.Я. «Приложение метода определения каузальных связей между временными рядами к теории климата: модель и природа».

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 5 работ в русско- и англоязычных изданиях, входящих в РИНЦ, из них 3 работы, входящих в перечень ВАК:

1. Skakun A.A., Volobuev D.M. Contribution of the Solar Constant Variations to Calculations of Insolation for the Holocene Period // Geomagnetism and Aeronomy. -2017. - V. 57. $-N_{2}7$. - P.902-905. Impact factor 0.701. https://doi.org/10.1134/S0016793217070180

2. Skakun A.A., Volobuev D.M. A causal link between TSI and climate index PDO during the last century // Conference paper "Conference on Solar and Solar -Terrestrial Physics-2018". -2018. P.343-346. DOI: 10.31725/0552-5829-2018-343-346

3. Skakun A.A., Volobuev D.M., Mordvinov A. V. Problems in Forecasting of the Decennial Solar Activity in Terms of TSI by the Method of Analogs //Geomagnetism and Aeronomy. $-2018. - V. 58. - N_{\odot}. 8. - P. 1081-1086$. Impact factor 0.701. https://doi.org/10.1134/S0016793218080157

4. Mordvinov A.V., Skakun A.A., Volobuev D.M. Long-term changes in total solar irradiance and their predictions // Geomagnetism and Aeronomy. – 2018. –V. 58. –№. 8.– P. 1175-1186. Impact factor 0.701. https://doi.org/10.1134/S0016793218080248

5. Skakun A.A., Volobuev D.M. Causal relationship between ocean climate indices and the solar constant over the past 100 years // Conference paper "Conference on Solar and Solar-Terrestrial Physics-2021". -2021. - p.237-240. DOI: 10.31725/0552-5829-2021-237-240

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы, включающего 117 наименований. Работа изложена на 96 страницах формата A4 и включает 19 рисунков и 5 таблиц.

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, а также положения, выносимые на защиту. Кратко изложены структура и содержание работы, дается характеристика научной новизны и практической значимости полученных результатов.

Первая глава «Инсоляция и ее составляющие» посвящена корректному определению термина инсоляция, способам ее расчета и вкладам ее орбитально обусловленной и обусловленной солнечной активностью компонент. В частности, рассматривается формула среднесуточной инсоляции из работы (Berger, 1978), в которую входят как значение TSI, так и орбитальные параметры (эксцентриситет, наклонение и климатическая прецессия). Рассматриваются значения орбитальных параметров от разных авторов (Berger and Loutre, 1991; Laskar et al., 2004), обсуждается, как неопределенности в их расчете могут отразиться на расчете инсоляции (для Голоцена никак не отражаются). Отдельно обсуждается TSI как обусловленная солнечной активностью составляющая инсоляции, кратко приводятся факты из истории эмпирических наблюдений TSI и приведены сведения о том, в какие годы и на каких аппаратах проводились наблюдения. Приведены результаты дискуссии научного сообщества об абсолютном среднем значении TSI (Zacharias, 2014) и сведения о доступных на данный момент композитных кривых современных наблюдений TSI (Wit et al. 2017). Большое внимание уделяется прокси, по которым можно реконструировать значения TSI (визуальные наблюдения солнечных пятен. относительное содержание углерода-14 (¹⁴C) в кольцах деревьев, и бериллия-10 (¹⁰Be) в кернах полярных льдов), обсуждаются возможные ограничения их использования (Обридко и Наговицын, 2017). Был произведен расчет годовой инсоляции в широтных поясах на протяжении Голоцена в двух случаях: 1) с учетом вариаций TSI и 2) без учета вариаций TSI. В качестве ряда TSI использовалась реконструкция (Vieira et al., 2011). Было получено, что вклад TSI в изменения годовой инсоляции становится заметным на приэкваториальных широтах, в то время как в полярных областях он

пренебрежимо мал по сравнению с трендовыми вариациями, вызванными изменениями орбитальных параметров. Этот факт позволяет нам использовать инсоляцию без учета вариаций СА для датирования ледяных кернов, полученных в полярных областях (Скакун и Липенков, 2016).

В то же время расчет годовой интегральной инсоляции для всей земной сферы показал, что в данном случае колебания солнечной постоянной играют основную роль в величине амплитуды на фоне тренда на снижение, обусловленного орбитальными вариациями. Тренды изменения инсоляции на протяжении Голоцена приводят к усилению межширотного градиента от раннего Голоцена к настоящему времени, что согласуется с результатами работы (Федоров, 2015).

Во второй главе «Метод условных дисперсий и его апробация» приводится подробное описание этого нелинейного метода определения направления причинной связи между временными рядами и приводится пример его использования. Этот метод впервые был введен в работе (Čenys et al., 1991) и уже успешно применялся для климатических рядов (Verbitsky et al., 2019). Приводятся требования, которым должны соответствовать временные ряды, чтобы метод корректно работал, и полный алгоритм работы метода, включая 1) подготовку входных данных, 2) реконструкцию по Такенсу (Takens, 1981), 3) оценку корреляционной размерности, 4) формулу расчета условной дисперсии. Работа метода иллюстрируется на примере двух связанных отображений Энона. Отдельно обсуждается методика оценки ошибок работы метода условных дисперсий с помощью искусственного добавления шума во временные ряды, т.н. метод Монте-Карло.

В третьей главе «Влияние инсоляции на климат на коротких временных масштабах» проводится анализ причинных связей между климатом Океана и солнечной активностью на основе климатических индексов NAO, NINO 3.4, PDO и TSI в контексте метода условных дисперсий, а также приводится оценка погрешностей работы метода. Приводятся примеры ранее уже найденных

соответствий между климатическими временными рядами и TSI. Высказывается предположение о том, что малые вариации амплитуды TSI (доли процента от среднего значения 1361 Вт м⁻²) в течение 11-летнего цикла солнечной активности могут усиливаться за счет нелинейных механизмов в климате Земли (Volobuev, 2014; White and Liu, 2008) и таким образом находить свое отражение в климатических временных рядах. В частности, речь идет о трёх эмпирических океанических индексах: Североатлантическое колебание (NAO), Эль-Ниньо (NINO 3.4) и Тихоокеанское десятилетнее колебание (PDO), отражающих сильные изменения шаблона локального климата в океане. На основе дополнительных источников информации (другие базы данных, известное соотношение сигнал-шум) для каждого из этих индексов оценена погрешность временного ряда. К вышеперечисленным временным рядам и TSI применяется метод условных дисперсий. Для калибровки метода рассматривается концептуальная модель взаимодействия Океан-Атмосфера (Jin, 1997). В эту модель в качестве форсинга вводится ряд TSI, а затем полученный с помощью этого форсинга модельный временной ряд Model T обрабатывается – в него добавляется нормально распределенный аддитивный шум, имитирующий ШУМ В эмпирических временных рядах. К полученному временному ряду и форсингу модели TSI применяется метод условных дисперсий. Он показывает наличие влияния TSI на модельный ряд, а также демонстрирует устойчивость работы метода к наличию шума в данных – даже при рассмотрении зашумленного временного ряда метод показывает наличие причинной связи.

Далее метод условных дисперсий применяется к эмпирическим временным рядам NAO, NINO 3.4, PDO и TSI, и их «шумовым реализациям» - временным рядам с добавлением нормально распределенного аддитивного шума со стандартным отклонением, полученным с помощью оцененных выше погрешностей временных рядов.

Результат работы метода получается следующим: 1) TSI влияет на NINO 3.4 и PDO; 2) для пар NAO – TSI, NAO – NINO 3.4 определить направление связи не

представляется возможным, т.к. метод слишком чувствителен к шуму в рядах в этом случае; 3) временные ряды NINO 3.4 и PDO относятся к локальному климату одного океана – Тихого, они синхронизированы и направление связи между ними определить нельзя. Таким образом, задача установления физических связей между климатом Океана и инсоляцией требует дальнейшего изучения, в частности, более внимательного подхода к определению погрешностей эмпирических временных рядов и оценке шума в них. Полученные результаты лишний раз доказывают сложность задачи выявления и определения относительного вклада эндогенных и экзогенных факторов в изменения земного климата. Дальнейшее развитие подхода нелинейной динамики к вопросу определения причинных связей позволит преимущественные выявить направления связи между параметрами климатической системы и предложить новые ограничения на климатические модели.

В четвертой главе «Прогноз декадных средних TSI в период 25-го солнечного цикла» тестируется метод аналогов Лоренца в качестве способа прогнозирования реконструкций солнечной активности, а также выполняется прогноз декадного среднего TSI на промежутке времени 2023 г. ± 5 лет. что подавляющее большинство известных прогнозов маркеров Указывается. солнечной активности делается для солнечных пятен (Petrovay, 2020), и их результаты разнятся между собой. При прогнозе TSI только по временному ряду TSI (т.н. статистический прогноз), в распоряжении исследователя есть наблюдательные данные (с 1978 г. до н.в.) и реконструкции по различным прокси (с 11 тыс. лет назад до н.в.). Метод аналогов Лоренца позволяет реализовать одношаговый прогноз временного ряда, используя сам временной ряд. Это метод был впервые предложен Лоренцем (Lorenz, 1969), модифицирован в работе (Farmer and Sidorowich, 1987), а затем реализован для прогноза ряда солнечных пятен (Volobuev and Makarenko, 2008). Метод заключается в поиске т.н. «аналогов» в том или ином смысле внутри временного ряда – наиболее похожих шаблонов. Необходимо найти прямое продолжение нескольких наиболее похожих на

конечный фрагмент временного ряда шаблонов и т.о. получить прогноз на следующую точку ряда. Алгоритм метода включает в себя такие этапы как 1) реконструкция фазового пространства, 2) поиск аналогов (близких точек фазового пространства), 3) построение прогноза на основе аналогов. Предполагается, что временной ряд отражает все типичные состояния системы, в частности, бифуркации, и содержит в себе повторяющиеся шаблоны изменений TSI в прошлом. Для реализации метода на временных рядах TSI вместо самих рядов рассматривается оценка производной по ИХ времени, что улучшает статистическую однородность ряда и увеличивает количество близких аналогов. Затем строится фазовое пространство, столбцы которого являются «аналогами», выбирается 4 самых близких аналога по принципу наименьших расстояний между ними и строится линейная модель, чтобы вычислить коэффициенты регрессии, позволяющие получить прогноз искомого значения производных по времени и самих значений.

Также производится оценка точности прогноза по эпигнозу (независимым прогнозам заранее известных значений). Рассматриваемая реконструкция делится на обучающую и тестовую выборки (тестовая выборка – последняя тысяча лет), далее алгоритм выполняет одношаговый прогноз временного ряда для каждой точки из растущей тестовой выборки и сравнивает полученное значение с известным настоящим значением временного ряда. Затем разброс значений разницы между спрогнозированным и настоящим значением сравнивается с таковым для т.н. инерционного или "климатического" прогноза - тривиального прогноза, который предполагает, что следующая точка ряда будет такой же, как предыдущая. Таким образом оценивается качество выполненного прогноза.

Рассматриваются реконструкции TSI по различным прокси: содержание бериллия-10 в антарктических ледяных кернах со станции Купол Фуджи и Южного полюса (Delaygue and Bard, 2011), данные о солнечном потенциале, полученные с помощью модели Bern3D-LPJ на основе атмосферного радиоуглеродного ряда (Roth and Joos, 2013), содержание радиоуглерода в кольцах

деревьев (9495 лет до н.э. – 1640 г.), наблюдения солнечных пятен (1640–1974 гг.) и магнитограммы солнечного диска (1974–2007 гг.) (Vieira et al., 2011). Качество каждой реконструкции тестируется по качеству выполненного по ней прогноза, в частности, выяснилось, что лучше прогнозируются реконструкции, восстановленные по однотипным прокси, например, космогенным изотопам.

Поэтому для прогнозирования 25-го солнечного цикла рассматривались только однородные реконструкции TSI: из работ (Egorova et al., 2018, 6757 г. до н.э. – 2016 г.), (Steinhilber et al., 2009, 7362 г. до н.э. – 2007 г.), (Roth and Joos, 2013, 8050 г. до н.э. – 2005 г.). Тестирование качества прогноза на основе сравнения с инерционным показало, что лучше всего прогнозируется ряд (Egorova et al., 2018). Далее производится прогноз декадных средних TSI по реконструкции (Egorova et al., 2018). Прогноз осуществляется для значения TSI, приходящегося на декаду 2023 г.±5 лет, полученное значение 1360.3 Вт м-2 соответствует средневековому максимуму по величине и не предполагает наличие гранд-минимума в следующем десятилетии.

Ошибка прогноза велика (ее максимальная величина составляет 1.2 Вт м⁻²), но, даже в рамках этой ошибки, полученный сценарий позволяет нам уверенно утверждать, что в ближайшее десятилетие не стоит ожидать начала гранд-минимума солнечной активности и TSI.

В заключении приводятся основные результаты работы:

• Получено, что вариации TSI во время Голоцена вносят больший вклад, чем вклад орбитальной составляющей инсоляции в случае ее осреднения за год и по поверхности земного шара (Skakun and Volobuev, 2017). Этот результат является верным по порядку величины, что было подтверждено в работе (Федоров, 2020). При рассмотрении интегральной инсоляции в широтных поясах было получено, что вклад вариаций TSI в приполярных регионах пренебрежимо мал и становится заметен только в районе экватора.

• Установлено, что метод условных дисперсий можно применять к климатическим временным рядам для определения причинных связей между

ними, при этом наличие неизбежного шума в эмпирических рядах вносит неопределенность в работу метода, но она достаточно мала, и ее можно оценить с помощью метода Монте-Карло (Skakun and Volobuev, 2018).

• С помощью метода условных дисперсий было обнаружено, что TSI влияет на NINO 3.4 и PDO (Skakun and Volobuev, 2021). Детектировать связь между NAO и TSI, NINO и NAO, NINO 3.4 и PDO этим методом не удалось, т.к. оценки условной дисперсии для зашумленных рядов не различают направление причинной связи.

• Установлено (Skakun, Volobuev, Mordvinov, 2018), что прогнозированию методом аналогов Лоренца лучше поддаются однородные реконструкции (по единственному источнику данных). Таким образом, этот прогноз может быть использован для тестирования однородности солнечных и климатических реконструкций.

• Выполнен прогноз декадной средней TSI в 25-м солнечном цикле с помощью метода аналогов Лоренца (Mordvinov, Skakun, Volobuev, 2018) на основе реконструкции TSI, выполненной по одному длительному ряду прокси (Egorova et al., 2018), включающему все типичные состояния соответствующей динамической системы на протяжении Голоцена. Точность прогноза была оценена по эпигнозу и сравнивалась с инерционным прогнозом. По нашим оценкам, в следующем 25-м цикле солнечной активности следует ожидать умеренный спад амплитуды (на 0.4 Вт м⁻²) и значение десятилетнего среднего TSI будет соответствовать средневековому максимуму по величине (1360.3 Вт м⁻²). Основной вывод: полученный сценарий не предполагает наличие гранд-минимума в следующем десятилетии.

ГЛАВА 1. ИНСОЛЯЦИЯ И ЕЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ

1.1 Определение инсоляции. Орбитальная и солнечная составляющие

Термин "инсоляция" обозначает долю солнечного излучения, приходящую на единичную площадку на верхнем слое земной атмосферы за единицу времени. времени "годовая", Инсоляция "летняя", может вводиться как во "среднесуточная", "суточная инсоляция 21 декабря", так и в пространстве в разных точках земного шара "на 65° с.ш." и площадях "в полосе от 30° ю.ш. до 30° с.ш." в зависимости от пределов интегрирования. В данной работе мы называем "инсоляцией" интегральную по спектру мощность солнечного излучения, приходящую на единичную площадку 1 м² на расстоянии 1 а.е. от Солнца. При расчете инсоляции мы не учитываем влияние земной атмосферы и климатические эффекты, например, альбедо.

Существуют две физические причины для изменений инсоляции – долгопериодические вариации параметров орбиты и короткопериодические солнечной постоянной (TSI) (см. рисунок 1.1). Первая составляющая определяется через характер движения Земли вокруг Солнца (рисунок 1.16), а вторая зависит только от физических процессов на Солнце (рисунок 1.1а). Считается, что на масштабах времени порядка тысяч и сотен тысяч лет превалирует орбитальная составляющая, а на масштабах от суток до сотен лет - обусловленная солнечной постоянной (Skakun and Volobuev, 2017). В число используемых в этой работе параметров орбиты входят эксцентриситет орбиты (регулирует форму орбиты), климатическая прецессия (меняет дату наступления перигелия) и наклонение орбиты (угол между плоскостью земного экватора и плоскостью орбиты вращения Земли вокруг Солнца) (см. уравнение 1).



Рисунок 1.1 - Схематичное определение термина "инсоляция" и двух его компонент. Объекты указаны не в реальном масштабе. Подграфик (а) иллюстрирует определение TSI, подграфик (б) - параметров орбиты.

1.1.1 Формула суточной инсоляции как основа расчета

При расчетах инсоляции в качестве базовой единицы мы будем использовать среднесуточную инсоляцию. Она рассчитывается по классической формуле (1) из работы (Berger, 1978):

$$Ins = \frac{TSI(1+e(\lambda-\omega))^2}{\pi(1-e^2)^2} \left(H_0 sin(\phi) sin(\delta) + cos(\phi) sin(H_0) \right)$$
(1)

где e – эксцентриситет орбиты, δ – склонение Солнца (включает наклонение орбиты), ω – долгота перигелия относительно точки весеннего равноденствия (причем е sin ω – климатическая прецессия), λ – солнечная долгота, φ – широта и H_0 – абсолютное значение часового угла в момент заката\рассвета. Предполагается, что все углы, которые определяют положение Земли на орбите,

остаются постоянными в течение дня. В климатических исследованиях предполагается, что параметры орбиты остаются фиксированными в течение года, расстояние от Земли до Солнца, солнечная долгота и склонение Солнца - в течение дня (фиксируется их значение в полдень), а часовой угол показывает время (Berger et al., 2010). Этот алгоритм расчета среднесуточной инсоляции разработан в среде MATLAB и доступен по ссылке https://eisenman-group.github.io/.

Нужно отметить, что момент времени, для которого рассчитывается инсоляция, определяется солнечной долготой. Ввиду эллиптичности земной орбиты имеет место нелинейное соотношение между календарной датой и λ , т.е. в различные годы одной и той же дате соответствуют различные значения солнечной долготы. Приближение этой зависимости приведено в работе (Berger, 1978). Нелинейность начинает сказываться на результатах при использовании шага по времени более 0.1 суток. В данной работе мы использовали алгоритм (Huybers, 2006) с шагом по времени 0.01 суток, что позволило нам избежать проблем, связанных с нелинейностью.

Орбитальные параметры (эксцентриситет, наклонение и климатическая прецессия) являются входными для формулы (1). Они получаются с помощью решения уравнений небесной механики и разнятся в зависимости от того, какие факторы учитывались в этих уравнениях. Два орбитальных решения очень распространены среди климатологов: Berg91 (Berger and Loutre, 1991) и La2004 (Laskar et al., 2004). Заметим, что на данный момент существуют улучшенные варианты (Laskar et al., 2011), но они не отличаются от предыдущих на протяжении Голоцена (см. раздел 1.4.1.1), поэтому здесь мы работаем именно с классическими расчетами. В данной работе мы будем рассматривать инсоляцию, посчитанную по орбитальным параметрам Berg91.

В формулу (1) также линейно входит солнечная «постоянная» (Total Solar Irradiance, TSI), которая характеризует непосредственно солнечную активность и определяется как интегральный (болометрический) поток излучения Солнца на расстоянии одной астрономической единицы (Vieira et al., 2011). Обозначим

изменения этой величины во времени TSI(t), а некоторое ее фиксированное значение - TSI(t₀). Кроме того, чтобы избежать путаницы в определениях, назовем инсоляцию, рассчитанную при предположении солнечной «постоянной» равной константе (TSI(t₀)), "орбитальной" инсоляцией I₀. Важно отличать "орбитальную" инсоляцию I₀ от полной инсоляции I_t = I₀(t) ×(TSI(t)/TSI(t₀)). Последняя учитывает как положение Земли на орбите, так и изменения солнечной «постоянной» во времени.

1.1.2 Различные способы расчета орбитально-обусловленной инсоляции по временному и пространственному признаку

В формулу расчета среднесуточной инсоляции (1) входит φ - широта места, для которого производится расчет. Есть очевидные зависимости инсоляции от широты в данный момент времени, обусловленные движением Земли по орбите вокруг Солнца и наклоном оси вращения - летом в северном полушарии инсоляция больше, чем зимой, и наоборот. Кроме того, имеет место неравенство значения широт в различных климатических исследованиях - в большинстве работ в качестве форсинга (внешней воздействующей силы) для моделей выступает летняя инсоляция на 65° с.ш. (в некоторых случаях среднеиюльская или среднесуточная на 21 июля). Летняя инсоляция на этой широте стала уже в каком-то смысле классической - так часто на нее ссылаются авторы (Lisiecki and Raymo, 2005; Huybers, 2006). Традиция использования этой инсоляции началась с классической работы Миланковича (Milankovitch, 1941). которой В OH аргументировал свой выбор тем, что для возникновения ледникового периода необходима комбинация прохладного лета и теплой зимы. Таким образом выпавший зимой снег не успевал растаять за лето и приводил к росту ледников (Смульский, 2013).

Эти мысли Миланковича и его предшественников нашли отражение в интерпретациях современных авторов. Некоторые физические механизмы изменений климата объясняют экстремальными значениями инсоляции.

Например, (Huybers, 2006) считает, что за периодику оледенений в Северном полушарии отвечает т.н. Integrated Summer Insolation (ISI), которая рассчитывается как сумма всех летних среднесуточных инсоляций, превышающих некое пороговое значение. Полученные для порога 275 Вт м⁻² значения ISI лучше отражают эмпирические ряды, чем привычные ряды инсоляции 21 июля. Такой подход позволяет им учитывать одновременно фактическую, а не календарную, продолжительность лета и вариации амплитуды инсоляции.

В работе (Raymo and Nisancioglu, 2003) предполагается, что инсоляционный градиент между высокими и низкими широтами играет превалирующую роль в изменениях объема оледенения в течение раннего Плейстоцена. В частности, авторы предлагают использовать межширотный градиент 20°-75° в качестве возможного форсинга оледенений в период времени до Среднеплейстоценового перехода.

В некоторых случаях также рассматривают местную инсоляцию - например, при датировании антарктических ледяных кернов методом орбитальной подстройки исследователей интересует, как менялась ISI непосредственно в месте отбора керна в полярных широтах (Скакун и Липенков, 2016; Raynaud et al., 2007; Lipenkov et al., 2011).

1.2 Орбитальная составляющая и факторы, влияющие на точность и длительность ее расчета

1.2.1 Прецессия, Наклонение орбиты и эксцентриситет – параметры расчета инсоляции

В формуле расчета среднесуточной инсоляции (1) задействованы три орбитальных параметра - эксцентриситет (*e*), наклонение орбиты (входит в склонение δ) и климатическая прецессия (*e* sin ω , где ω - долгота перигелия). Эти величины имеют характерный период квазиколебаний - 100 тыс. лет для эксцентриситета, 41 тыс. лет для наклонения, 23 и 19 тыс. лет для климатической прецессии (Berger and Loutre, 1992). Последнюю важно отличать от "обычной"

прецессии с периодом 26 тыс. лет. Это отличие связано с разными системами отсчета - климатическая прецессия отсчитывается как угол между земной осью и линией апсид, но последняя также вращается и таким образом изменяет период колебаний (Большаков, 2003).

1.2.2 Ограничения длительности расчета инсоляции в связи с нелинейной природой и неучтенные физические факторы

Как известно, движение планет в Солнечной системе является хаотическим (Laskar, 1989) со временем Ляпунова порядка 5 млн лет. Таким образом, время, на которое возможно предсказать параметры орбит небесных тел, ограничено неопределенностью начальных условий и параметров модели. В статье (Laskar, 1999) было получено, что самым значительным источником неопределенности является факт сплюснутости Солнца, который ограничивает возможность расчета параметров орбиты до 26 млн лет, а в число остальных входят влияние спутников (лун) планет (35 млн лет) и малых тел Солнечной системы (32 млн лет), приливные диссипации в системе Земля-Луна (40 млн лет), потеря массы Солнцем (50 млн лет), эффекты ОТО (35 млн лет) и эффект Лензе-Тирринга (31 млн лет). Кроме того, существуют неопределенности начальных условий: неточности в определении масс планет и их расположения (60 млн лет). В рамках нашей работы мы рассматривали инсоляционные ряды длительностью не более 11 тыс. лет, что позволяет нам не обращать внимание на вышеперечисленные факторы.

1.3 Составляющая инсоляции, обусловленная солнечной активностью. Современные наблюдения и реконструкции в Голоцене

Полный поток излучения Солнца (TSI) или солнечная "постоянная" оказывает влияние на широкий спектр различного рода земных процессов, в частности, в атмосфере, и его прогнозирование позволит сделать выводы о сценариях развития этих процессов.

1.3.1 История эмпирических наблюдений TSI

Попытки измерить TSI предпринимали еще в 1830-х годах независимо друг от друга Джон Гершель и Клод (Матиас) Пулье (Launay, 2007) актинометрами собственной разработки. Их измерения оказались сильно занижены (практически в два раза по сравнению с современными значениями), а плохая чувствительность приборов не позволила заметить вариации амплитуды TSI. Так, благодаря несовершенству измерительных приборов и наличию атмосферы появился термин "солнечная постоянная" для обозначения квазипериодической величины TSI. Первая оценка TSI, полученная с помощью актинометра Пирсона в 1877 году, показала значение 8-9 л.с. на 100 кв. футов или 633 Вт м⁻² (The dynamic measurement and utilization of solar heat, 2013).

Первое доказательство вариабельности TSI было получено только сотню лет спустя, после запуска аппарата Nimbus 7 в ноябре 1978 года с Hickey-Frieden absolute cavity radiometer на борту (см. таблицу 1.1). Следом за ним в феврале 1980 года на борту спутника NASA "Solar Maximum Mission" (SMM) начал свою работу Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor (ACRIM I), а в октябре 1984 года был запущен Earth Radiation Budget Satellite (ERBS) в рамках проекта Earth Radiation Budget Experiment (ERBE). Далее запуски продолжались - ACRIM II на борту Upper Atmosphere Research Satellite (UARS) и ACRIM III на борту ACRIMSAT в 1991 и 1999 годах, спутник SoHo (Solar and Heliospheric Observatory) с проектом Variability of solar IRradiance and Gravity Oscillations (VIRGO) в 1996 году, SOlar Radiation and Climate Experiment (SORCE) в 2003 году, спутник PICARD с инструментами PREMOS и SOVAP на борту в 2010 году, the Total and Spectral Solar Irradiance Sensor (TSIS-1) в 2017 году. Работа этих аппаратов позволила получить перекрывающие друг друга во времени данные об изменениях TSI. Эти TSI, данные уверенно подтверждали наличие квазипериодичности В соответствующей пятенной активности Солнца.

Таблица 1.1 - Даты запуска космических аппаратов, которые измеряли TSI на протяжении длительных промежутков времени (от года). Подобные таблицы с более подробными сведениями приведены в работах (Zacharias, 2014; Wit et al., 2017).

Название	Дата запуска	Дата окончания	Ссылка
HF (Nimbus 7 ERB)	Нояб-1978	Янв-1993	(ASDC Projects NIMBUS-7, 1978)
ACRIM I (SMM)	Февр-1980	Нояб-1989	(SMM Home Page, 1980)
ERBE (ERBS)	Окт-1984	Авг-2003	(ERBE – NASA Langley Research Center Science Directorate, 1984)
ACRIM II (UARS)	Окт-1991	Нояб-2001	(ASDC Projects ACRIM II, 1991)
VIRGO (SoHo)	Янв-1996	Нояб-1999	(The "Official" VIRGO Home Page!, 1996)
ACRIM III (ACRIMSAT)	Дек-1999	Нояб-2013	(ASDC Projects ACRIM III, 1999)
TIM SORCE (Pegasus XL)	Янв-2003	Фев-2020	(SORCE, 2003)
SOVAP (PICARD)	Июнь-2010	Апр-2014	(Meftah et al., 2016)
PREMOS (PICARD)	Июнь-2010	Апр-2014	(Schmutz et al., 2013)
TSIS-1	Дек-2017	по настоящее время	(TSIS – 1 » Data, 2017)

1.3.2 Различные абсолютные значения TSI: VIRGO scales

Обычно для построения климатических моделей достаточно знать относительные вариации TSI, а определение абсолютного значения выглядит как интересное упражнение и не имеет практической пользы. Однако в работе (Wild et al., 2013) было показано, что это значение очень важно для оценки радиационного баланса Земли. Кроме того, оно необходимо для сравнения относительных вкладов амплитуд орбитальной и солнечной компонент инсоляции (Skakun and Volobuev, 2017).

До 2003 года считалось, что абсолютное среднее значение TSI составляет величину порядка 1365.4 \pm 1.3 Вт м⁻² (Сготтеlynck et al., 1995; Fröhlich and Lean, 1998; Zacharias, 2014). Но более точные измерения, произведенные аппаратом SORCE, показали, что это значение меньше на 5 Вт м⁻² и на момент солнечного минимума 2008 года составляет 1360.8 \pm 0.5 Вт м⁻² (Корр and Lean 2011). Чтобы разобраться в причинах такого различия между измерениями, исследователи организовали семинар в National Institute of Standarts and Technology (NIST) в 2005 году. По его итогам было решено провести лабораторные испытания, чтобы выявить причины такого большого (0.35%) разброса абсолютных значений. Лабораторную установку TSI Radiometer Facility (TRF) спроектировали в Laboratory for Atmospheric and Space Physics (LASP) (Корр et al., 2007) и провели тесты SORCE, VIRGO, ACRIM-III, PICARD, позволившие выявить несовершенства приборов, ранее побывавших на орбите, и откалибровать новые (Корр et al., 2012).

Аппарат PREMOS на борту PICARD стал первым радиометром, который был точно откалиброван в соответствии с TRF еще до запуска на орбиту. Он показал абсолютное значение TSI = 1360.9 ± 0.4 Вт м⁻² на момент 27 июля 2010 года (Schmutz et al., 2013). Его измерения позволили внести поправки в наблюдения других приборов и привести их к единому масштабу. Таким

образом, в литературе можно встретить измерения в т.н. "VIRGO scale" (порядка 1365 Вт м⁻²) и "new VIRGO scale" (порядка 1361 Вт м⁻²), соответственно.

1.3.3 Композитные кривые современных наблюдений TSI

Исследователей климата больше интересуют композитные кривые TSI, объединяющие наблюдения на разных аппаратах, чем каждое наблюдение в отдельности. Основные композитные ряды приведены в работе (Wit et al., 2017), в их число входят PMOD (Fröhlich and Lean, 1998), ACRIM (Willson, 1997; Willson and Mordvinov, 2003), RMIB (Dewitte et al., 2004; Mekaoui and Dewitte, 2008), а также полуэмпирические временные ряды, полученные комбинацией модельных расчетов и наблюдений, - NRLTSI2 (Coddington et al., 2016) и SATIRE-S (Yeo et al., 2014). Кроме того, не так давно появился т.н. "Community-Consensus TSI Composite", созданный по методике (Wit et al. 2017).

В нашей работе композитные кривые будут использоваться в качестве продолжения ("хвоста") голоценовых реконструкций TSI в разделе 4.2.1, а также в качестве астрономического форсинга в главе 3.

1.3.4 Связь TSI и других прокси солнечной активности

Главным образом вариации TSI связаны с изменениями магнитной активности Солнца на уровне фотосферы и хромосферы, причем пятенные проявления магнитной активности приводят к уменьшению, а факельные - к увеличению яркости (Обридко и Наговицын, 2017). В целом, последние преобладают, и изменения TSI происходят в фазе с 11-летним циклом активности, что позволяет делать реконструкции TSI в прошлое по различным индексам активности, таким как площади солнечных пятен (Preminger and Walton, 2006), геомагнитный индекс Aa (Georgieva et al., 2015) или космогенные изотопы ¹⁰Be, ¹⁴C (Wu et al., 2018). Сами значения индексов активности восстанавливаются по

различным источникам данных, что может приводить к их противоречивым оценкам. В частности, оценки числа солнечных пятен во время минимума Маундера разнятся в зависимости от того, на основании какого исторического архива данных они были построены (Zolotova and Ponyavin, 2015).

Таким образом, переход к единственному прокси TSI, особенно для долговременных вариаций, приводит к неизбежным неточностям. Например, пятенная активность проявляется иногда отлично от других индексов, в частности, во время минимума Маундера число пятен могло быть практически нулевое (Eddy, 1976), в то время как другие индексы, например, северные сияния (Schröder, 1992) предполагают наличие вариаций солнечной активности. Кроме того, космогенные изотопы, как и северные сияния и Аа- индекс, сильно зависят от межпланетного магнитного поля, опосредованно связанного с солнечной активностью, и, тем самым, вносят дополнительную неопределенность в TSI (Delaygue and Bard, 2011).

В частности, так как радиоуглерод является частью глобального углеродного цикла, его текущее содержание в атмосфере не равняется спродуцированному космическими лучами в данный момент времени, оно сглаживается и откладывается в природных хранилищах (например, кольцах деревьев) с временной задержкой, связанной с большой емкостью океана. В течение последнего столетия вариации В его количестве BO многом вызваны антропогенным фактором (т.н. Зюсс-эффект (Tans et al., 1979) и бомб-эффект (Broecker et al., 1985)) и не могут быть использованы для реконструкции солнечной активности без учета этих эффектов.

Изотоп бериллия-10 не доставляет таких неудобств в плане антропогенного влияния и довольно быстро (в пределах одного года) откладывается на поверхности в составе снега и льда. Но последний факт накладывает ограничения на временное разрешение (в среднем порядка нескольких десятилетий для Антарктиды, порядка года для Гренландии) и длительность записи данных. Также содержание ¹⁰Ве во льду сильно зависит от изменений в циркуляции атмосферы и скорости выпадения осадков, что вносит в данные климатический шум.

Таким образом, в атмосферное содержание космогенных изотопов вносят свой вклад экранирование геомагнитным полем, глобальный углеродный цикл, атмосферный перенос и выпадение осадков (Muscheler et al., 2016). Указанные выше факторы косвенно также влияют на точность прогнозирования восстановленного ряда TSI (см. раздел 4.2).

В некоторых работах подсчитывается соответствие между числом пятен и TSI: например, (Privalsky, 2021) предполагает, что изменению числа пятен на 10 единиц соответствует изменение TSI на 0.05 Вт м⁻², а также что TSI запаздывает относительно числа пятен на 2 месяца.

В литературе рассматриваются различные механизмы воздействия солнечной активности на климат, в частности, воздействие галактических космических лучей через изменения прозрачности атмосферы (Svensmark, 1998), но такие предположения не всегда находят подтверждение в наблюдательных данных и в экспериментах (Laut, 2003). В данной работе мы принимаем гипотезу о воздействии СА на климат через TSI в качестве основной, поскольку физический механизм изменения температуры под воздействием инсоляции не подлежит сомнению.

1.4 Оценка влияния орбитальной и солнечной составляющих на примере реконструкции TSI за период Голоцена

Реконструкции TSI отличаются использованием разных прокси, а также вспомогательных данных и моделей для коррекции вышеприведенных факторов. Кроме того, реконструкции TSI не учитывают долгопериодических вариаций, связанных с изменением параметров орбиты Земли. Далее в этой главе мы приведем варианты широтно-зависимой и интегральной по поверхности Земли реконструкции TSI в Голоцене с учетом медленно-меняющихся параметров орбиты (Skakun and Volobuev, 2017).

Мы предполагаем, что вклад солнечной постоянной в полную инсоляцию обусловливает ее более короткопериодические вариации, т.к. в настоящее время данных о вариациях солнечной постоянной за пределами Голоцена не существует. В работах современных климатологов, в зависимости от нужд конкретного исследования, используется либо «орбитальная» инсоляция, либо TSI. Принято считать, что для длительных климатических рядов (поздний плейстоцен и далее) эффективным индексом солнечного воздействия (форсинга) являются изменения «орбитальной» инсоляции I_o (Raynaud et al., 2007; Lipenkov et al., 2011). Роль изменений TSI в климатологии стала активно обсуждаться сравнительно недавно, в первую очередь для циклической 11-летней составляющей (Stevens and North, 1996; Volobuev, 2014). Действительно, прямые болометрические измерения TSI стали доступны лишь в эпоху спутниковых наблюдений (последние 40 лет), наземные наблюдения были слишком зашумлены, чтобы позволить обнаружить малую по амплитуде (0.1%) 11-летнюю вариацию (Корр, 2018). Исходя из явной корреляции с солнечной активностью, значения TSI на промежутке вплоть до 11 тыс. лет назад (начало Голоцена) могут быть восстановлены по косвенным данным: наблюдениям солнечных пятен (1640–1950 г.г. н.э.) и содержанию радиоуглерода в кольцах деревьев (9050 г. до н.э. – 1640 г. н.э.), e.g. (Vieira et al., 2011). Таким образом, для относительно коротких (в пределах эпохи Голоцена) климатических временных рядов эффективным индексом солнечного воздействия принято считать вариации TSI (Bond et al., 2001; Haigh, 2001), пренебрегая орбитальной составляющей инсоляции. В какой справедливо мере ЭТО историческое разделение и каков количественный вклад двух физических составляющих (изменение параметров орбиты и солнечная активность) в полную инсоляцию для эпохи Голоцена, мы выяснили в этой главе.

1.4.1 Влияние различных орбитальных решений на расчет инсоляции в Голоцене

Сравнение среднесуточных инсоляций Berg91 и La2004 на 21 декабря на широте -77° показало, что на временном промежутке длиной в 500 тыс. лет амплитуды для этих двух решений разнятся вплоть до 20 Вт м⁻², в то время как во время Голоцена различие не превышает 0.4 Вт м⁻² (что составляет сотые доли процента от среднего значения инсоляции и в два-три раза меньше изменений TSI в 11-летнем цикле). Этот результат приведен на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 - Сравнение среднесуточной инсоляции по орбитальным решениям Berg91 и La2004.

Это означает, что в течение Голоцена в расчетах инсоляции разницей между орбитальными решениями можно пренебречь, и основным источником неопределенности являются неточности реконструкции TSI. В их число входят как ошибки на этапе реконструкции магнитного потока Солнца (в частности, неточности моделей углеродного цикла, измерений содержания космогенного радиоуглерода в кольцах деревьев, и, главное, неточности археомагнитных реконструкций изменений дипольного магнитного момента Земли), так и на этапе анализа современных измерений TSI (в частности, калибровка различных измерений). В этой работе мы будем использовать орбитальное решение Berg91.

1.4.2 Интегральная годовая инсоляция: методика расчета

В работе (Skakun and Volobuev, 2017) рассмотрена интегральная годовая инсоляция, рассчитанная как сумма среднесуточных, для каждого широтного пояса. Сетка широт была задана от –89.5° до 89.5° с шагом 1°, форма Земли аппроксимировалась сферой. Хотя при модели Земли в виде трехосного эллипсоида могут возникать дополнительные короткопериодические вариации, но они имеют амплитуду менее 0.09% (Федоров, 2015; Федоров et al. 2020), что дает нам право пренебречь этими особенностями. Все интегральные по сфере или полушариям величины вычисляются следующим образом: для каждой широты считается ее годовая инсоляция, затем это значение умножается на площадь сферического сегмента, аппроксимирующего поверхность Земли. Центр сегмента привязан к соответствующей широте и имеет толщину 1°.

1.4.3 Широтные градиенты интегральной годовой инсоляции

Вариации солнечной постоянной составляют доли процента от ее среднего значения (1365 Вт м⁻²) и на первый взгляд кажутся совсем малыми. Однако расчет годовой инсоляции на различных широтах показал, что вклад TSI в изменения полной инсоляции становится заметным на приэкваториальных широтах, в то время как в полярных областях он пренебрежимо мал по сравнению с трендовыми вариациями $I_o(t)$, вызванными изменениями орбитальных параметров (см. рисунок 1.3).

Таким образом, в полярных областях можно использовать только орбитально обусловленную составляющую инсоляции $I_o(t)$ в качестве прокси полной инсоляции для эпохи Голоцена. Также можно заметить, что инсоляция экваториального пояса имеет тенденцию повышаться со временем за счет длительных изменений параметров орбиты, в то время как инсоляция

приполярных поясов понижается (рисунок 1.3). Таким образом, говоря о пространственном распределении инсоляции по поверхности Земли, можно сделать вывод об усилении межширотного градиента инсоляции, что согласуется с результатами (Федоров, 2015).



Рисунок 1.3 - Суммарная годовая инсоляция в различных широтных поясах. Рассмотрены пояса, центрированные на 75° ю.ш., экваторе, 75° с.ш.. Сплошными линиями показаны вариации инсоляции с учетом изменений солнечной постоянной, пунктирными – без их учета. Видно, что вариации изменений солнечной постоянной имеют значимую амплитуду только на экваториальном поясе.

Аналогичная ситуация наблюдается и для инсоляционных градиентов между экватором и широтами $\pm 30^{\circ}$: колебания солнечной постоянной TSI(t) определяют основные вариации, а орбитальная составляющая $I_o(t)$ вносит лишь незначительный тренд.

1.4.4 Интегральная годовая инсоляция по всей сфере

Расчет интегральной инсоляции для всей земной сферы показал, что в данном случае колебания солнечной постоянной играют основную роль в величине амплитуды на фоне тренда на снижение, обусловленного орбитальными вариациями (см. рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 - Интегральная инсоляция по всей сфере. Сплошной линией показаны изменения инсоляции с учетом вариаций солнечной постоянной, пунктирной – без их учета. Основной вклад в изменения полной инсоляции дают вариации солнечной постоянной TSI(t). Видно, что имеет место медленный тренд на понижение с течением времени, обусловленный изменениями орбитальных параметров $I_o(t)$.

Полученное нами значение (5.49353E+24 Дж) несколько выше, чем у (Федоров et al., 2020) (5.47288E+24 Дж для эллипсоида и 5.47752E+24 Дж для сферы) за счет использования разных абсолютных значений TSI (1365 Вт м⁻² в данной работе, 1361 Вт м⁻² в работе (Федоров et al., 2020)), а также разных промежутков усреднения по времени (в нашей работе расчет актуален на последнюю тыс. лет, в работе (Федоров et al., 2020) он усреднен от 3000 лет до н.э.
до 2999 лет н.э.). При этом разница величин в рамках одного расчета Федорова для эллипса и для сферы составляет 0.085%, в то время как разница сферических расчетов в нашей работе и у Федорова составляет 0.291%. Таким образом, разница в оценке интегральной инсоляции больше обусловлена выбором абсолютного значения TSI, чем предполагаемой формой Земли. Также для контроля был произведен перерасчет значения, полученного в нашей работе, для абсолютного значения TSI = 1361 Вт м⁻². Полученное значение отличается от (Федоров et al., 2020) всего на 0.002%, что подтверждает правдоподобность наших результатов.

Таблица 1.2 - Сравнение значений интегральной инсоляции для всей земной сферы в работах (Скакун и Волобуев, 2017) и (Федоров et al., 2020).

Интегральная инсоляция для всей земной сферы, Дж Е+24					
	Эллипсоид	Сфера		Разница, %	
Скакун, Волобуев, 2017	-	5.49353 TSI = 1365	5.47743 TSI = 1361	-	
Федоров et al., 2020	5.47288 TSI = 1361	5.47752 TSI = 1361		0.085	
Разница, %	-	0.291	0.002	-	

1.5 Выводы к главе 1

Величина инсоляции определяет количество солнечной энергии, приходящей на верхний слой атмосферы Земли. При рассмотрении длинных (порядка нескольких десятков и сотен тыс. лет) инсоляционных рядов исследователи обычно пренебрегают составляющей, обусловленной солнечной активностью, уделяя внимание только орбитально обусловленной составляющей. Данный факт обоснован тем, что вариации TSI за последние десятилетия составляют доли процента от среднего значения, а на более длительных временах недостаточно изучены. В то же время расчет орбитальных параметров, необходимый для оценки орбитально-обусловленной составляющей, может быть произведен с достоверностью только на промежутке времени до 5 млн лет. Хотя существует ряд неучтенных факторов, приводящих к ошибкам в вычислениях, основным фактором является наличие положительного показателя Ляпунова.

В зависимости от пространственных (широты) и временных факторов (промежуток интегрирования) инсоляцию можно определить многими различными способами. Каждый тип инсоляции играет свою отдельную роль в изменениях погоды И И имеет различный Фурье-спектр климата С «орбитальными» частотами. B качестве основной доминирующими инсоляционной кривой в климатологии выбрана местная инсоляция на 65° с.ш., которая успешно используется во многих моделях как форсинг.

Мы использовали данные реконструкции TSI и расчеты орбитальных параметров для оценки инсоляции во время Голоцена, учитывая вариации TSI (обычно ее полагают константой) и получили, что эти вариации вносят больший вклад, чем вклад орбитальной составляющей, в случае среднегодовой инсоляции по всему земному шару. Этот результат является верным по порядку величины, что было подтверждено в работе (Федоров et al., 2020).

Кроме того, мы рассмотрели интегральную инсоляцию в широтных поясах и получили, что вклад вариаций TSI в приполярных регионах пренебрежимо мал и становится заметен только в районе экватора. Тренды изменения инсоляции на протяжении Голоцена приводят к усилению межширотного градиента от раннего Голоцена к настоящему времени, что согласуется с результатами (Федоров, 2015).

ГЛАВА 2. МЕТОД УСЛОВНЫХ ДИСПЕРСИЙ И ЕГО АПРОБАЦИЯ

Далее мы будем рассматривать такое явление как причинная связь между временными рядами в контексте нелинейной динамики. В этой главе мы опишем один из методов определения направления причинной связи между системами по наблюдаемым временным рядам - метод условных дисперсий, который уже успешно применялся ранее для климатических данных (Дергачев et al., 2001; Verbitsky et al., 2019). Этот метод мы будем использовать в следующей главе.

2.1. Начальные предположения

Мы будем исходить из предположения, что рассматриваемые нами эмпирические временные ряды, описывающие земной климат и солнечную активность, спродуцированы нелинейными динамическими системами, обладающими свойствами детерминированного хаоса.

Это означает, что выполняется так называемое кредо идеального экспериментатора (Афраймович и Рейнман, 1989), а именно:

1. существует неизвестная нам динамическая система, заданная в виде дифференциальных или разностных уравнений с типичными начальными условиями,

2. траектории этой системы в фазовом пространстве образуют низкоразмерное компактное притягивающее множество (аттрактор), траектории на котором разбегаются не быстрее, чем экспоненциально,

3. существует (Липшиц) непрерывная типичная проекция фазовой траектории на вещественную ось R - временной ряд,

4. аттрактор снабжен инвариантной эргодической мерой, которая может быть реализована, например, как время, которое траектория проводит в фиксированном фазовом объеме.

Тогда можно восстановить копию аттрактора (т.н. "псевдоаттрактор") непосредственно по временному ряду в обычном евклидовом пространстве R^{M} подходящей размерности M как топологическое вложение временного ряда,

основываясь на теореме Такенса (см. раздел 2.3.2). Такое вложение является обратимым непрерывным отображением оригинала. Поэтому реконструкцию можно рассматривать как "детерминированное" объяснение наблюдаемых рядов и использовать для оценок инвариантов: размерности, Ляпуновских экспонент и динамической энтропии.

2.2 Описание метода

Метод условных дисперсий является вариантом метода ближайших соседей и впервые был введен в работе (Čenys et al., 1991). Он позволяет обнаружить причинно-следственную связь между двумя динамическими системами по временным рядам, которые рассматриваются как проекции их фазовых траекторий (Schneider and Grassberger, 1997).

В частности, мы отвечаем на два вопроса:

- 1) Есть ли связь между двумя временными рядами, которые продуцируются динамическими системами?
- 2) Если да, то какая система является управляющей, а какая управляемой (Quiroga et al., 2000)?

Первым шагом в решении этих вопросов будет извлечение информации об оригинальной (родительской) системе из ее реконструкции по временному ряду. В частности, необходимое для реконструкции вложения евклидово пространство должно иметь размерность M, которая связана, согласно теореме Такенса, с неизвестной нам размерностью оригинального аттрактора D соотношением $M \ge 2D + 1$ (Безручко и Смирнов, 2005). Физическая интерпретация этого соотношения достаточно проста: для построения образа D-мерной точки в псевдофазовом пространстве реконструкций необходимо иметь D координат, Dскоростей и время. Поскольку мы не знаем размерность оригинала, предполагают, что его оценкой может служить так называемая корреляционная размерность реконструкции (Афраймович и Рейнман, 1989). Далее реализуется алгоритм построения реконструкции по Такенсу для двух временных рядов, в результате чего мы получаем два "псевдоаттрактора" и можем переходить к оценкам условных дисперсий (Čenys et al., 1991).

Для этого предполагается, что если в одной реконструкции выполняется некоторое условие, наложенное на близость точек псевдоаттрактора, то оно должно выполняться и во второй, причем оценка критерия взаимной связи должна непрерывно зависеть от параметра близости при наличии связи между системами. В противном случае, такая зависимость исчезает. Асимметрия вычисления условной дисперсии относительно аргументов в некоторых случаях позволяет определить роли "драйвера" и "отклика" во взаимодействии систем.

Метод условных дисперсий начинается с оценки количества точек восстановленного псевдоаттрактора, расстояние между которыми меньше є, при условии такой же є-близости у синхронных точек второго псевдоаттрактора (Schneider and Grassberger, 1997). Эвристически, этот метод рассматривает одну из реконструкций как непрерывное преобразование второй в координатах Такенса.

Таким образом, мерой наличия причинно-следственной связи будет выступать график зависимости условной дисперсии $\sigma(\varepsilon)$ от радиуса ε .

2.3 Алгоритм диагностики связи

2.3.1 Подготовка входных данных

В качестве входных данных используются два временных ряда, спродуцированных динамическими системами, между которыми необходимо проверить наличие причинной связи. Для корректной работы метода эти временные ряды должны быть эквидистантными и гладкими, а также иметь соответствующий задачам метода шаг по времени. Существует много способов получения эквидистантных данных и заполнения пропусков. Мы использовали сглаживающие сплайны, которые ранее уже применялись в подобных случаях (см., например, (Volobuev and Makarenko, 2008)), либо скользящее среднее. Кроме того, временные ряды подвергались традиционной нормировке по формуле (2):

$$x = (x_{orig} - \overline{x_{orig}}) / \langle x_{orig} \rangle$$
(2)

где *x* - нормированный временной ряд, x_{orig} - оригинальный временной ряд, $\overline{x_{orig}}$ - среднее значение временного ряда, $< x_{orig} >$ - стандартное отклонение временного ряда.

2.3.2 Реконструкция Такенса или отображение запаздывающих координат

Перед нами стоит задача получить информацию о системе целиком, зная только наблюдаемый ряд, т.е. восстановить фазовую геометрию системы на основе ее "детерминированно порожденной наблюдаемой" - скалярного временного ряда.

Рассмотрим такой пример: предположим, что мы наблюдаем проекцию кругового движения точки в декартовой системе координат, начало которой совпадает с центром окружности. Располагая лишь одной проекцией, например, x=sin t, легко восстановить недостающую проекцию y=cos t, заметив, что ею будут отсчеты x, взятые с сдвигом $\Delta t = \pi/2$: $y(t) = x(t + \pi/2)$. Заметим, что сдвиг эквивалентен взятию первой производной, в конечных разностях. Поэтому пары $(x(t), y(t)); (x(t), x(t + \pi/2)); (x(t), dx/dt)$ - это эквивалентные представления одной и той же круговой орбиты. Естественным обобщением на трёхмерное пространство будет тройка:

 $(x(t), x(t + \Delta t), x(t + 2\Delta t)) \sim (x(t), y(t), z(t)) \sim (x, dx/dt, d^2x/dt^2)$

Этот простой способ построения многомерного вектора из одномерной последовательности называют алгоритмом запаздывающих координат. Как отмечалось в (Безручко и Смирнов, 2005), этот прием успешно использовался для построения фазовых портретов осциллирующих сигналов задолго до пионерской работы (Packard et al., 1980) и теоретического обоснования алгоритма (Takens, 1981). Итак, согласно этому алгоритму по формуле (3) мы составляем набор из M векторов последовательных значений ряда x(t):

$$x_{i}^{M} = M^{-1/2} \{ x_{i}, x_{i+1}, \dots, x_{i+M-1} \}$$
(3)

В этом выражении использован сдвиг по времени (лаг) на единицу. На практике выбор оптимального лага представляет собой отдельную задачу, которую мы не обсуждаем здесь. Заметим лишь, что этот выбор должен гарантировать получение независимых, в конструктивном смысле, многомерных координат (Packard et al., 1980).

Полученная таким образом реконструкция является топологической *М*-мерной копией оригинального аттрактора. Наглядный пример применения алгоритма показан на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 - Иллюстрация методики построения сдвиговой реконструкции Такенса. На подграфике (а) изображен фрагмент временного ряда X и его смещенные во времени значения Y и Z (сдвиг на 2 и 4 точки относительно ряда X, соответственно). На подграфике (б) изображено пространство координат (X,Y, Z) и полученный в результате псевдоаттрактор.

Аналогичная процедура проводится со вторым временным рядом у.

Для определения размерности вложения *М* необходимо сначала рассчитать корреляционную размерность временного ряда *x* в соответствии с описанной в следующем разделе процедурой. При выполнении кредо идеального экспериментатора корреляционная размерность реконструкции служит корректной оценкой емкости (бокс-размерности) оригинала (Афраймович и Рейнман, 1989).

2.3.3 Оценка корреляционной размерности рядов

Корреляционная размерность характеризует сложность поведения системы посредством описания сложности ее аттрактора. Эта мера была введена в пионерской работе (Grassberger and Procaccia, 1983) и может интерпретироваться как число независимых параметров системы. Для вычисления корреляционной размерности D используется понятие корреляционного интеграла, который оценивает число близких пар k-мерных векторов. Поскольку размерность реконструкции заранее неизвестна, в векторных пространствах пробной размерности k, наделенных подходящей метрикой $\rho(n, n)$, подсчитаем число l-близких пар векторов с помощью формулы (4):

$$C_{k}(l) = \lim_{N \to \infty} \frac{1}{N^{2}} \sum_{n=1}^{N} \sum_{n'=1}^{N} \Theta \left[l - \rho_{k}(n, n') \right]$$
(4)

где $C_k(l)$ - корреляционный интеграл, k - размерность векторов, $\rho_k(n,n')$ - расстояние между точками последовательности построенных векторов, l - параметр близости, N - полное число элементов в рассматриваемой последовательности векторов, $\Theta(x)$ - функция Хевисайда: $\Theta(x) = 1$ если x > 0 и $\Theta(x) = 0$ в противном случае, т.е. $\Theta(x)$ играет роль счетчика пар точек, расстояние между которыми меньше l.

При возрастании пробной размерности k справедливо масштабирование по формуле (5) (Grassberger and Procaccia, 1983):

$$C_k(l) \sim l^{D_k} \tag{5}$$

График зависимости $C_k(l)$, построенный в двойном логарифмическом масштабе, позволяет оценить *D* как наклон линейного участка, если он существует (Шустер, 1988).

Приведем пример расчета корреляционной размерности для системы Лоренца, определяемой по формуле (6):

$$egin{cases} \dot{x}_1 &= a(x_2-x_1)+(y_1-x_1)\ \dot{x}_2 &= cx_1-x_1x_3-x_2\ \dot{x}_3 &= x_1x_2-bx_3 \end{aligned}$$

где a = 10, b = 8/3, c = 28. Начальные условия для $(x_1, x_2, x_3) = (10,9,8)$, диапазон интегрирования (0:0.01:300). В качестве временного ряда используем значения переменной x_1 .

Соответствующие наклоны $C_k(l)$ для разных k приведены на рисунке 2.2. Видно, что при k > 2 наклон стабилизируется. Иными словами, искомая корреляционная размерность выражается как предел последовательности этих наклонов и достигает насыщения, которое показано на рисунке 2.3.

Таким образом для системы Лоренца мы получаем величину корреляционной размерности *D* = 2.06. Этот же алгоритм можно применять для различных климатических временных рядов, чтобы оценить размерность вложения в реконструкции Такенса для реализации метода условных дисперсий.



Рисунок 2.2 - Зависимость $\log_2(C(l))$ от $\log_2(l)$ для системы Лоренца при значениях k=1:12 (на графике расположены слева направо). Синим цветом показаны отрезки прямых, по которым в каждом случае определялся угол наклона графика.



Рисунок 2.3 - Зависимость угла наклона графика корреляционного интеграла от размерности пространства вложения. Насыщение или плато соответствует корреляционной размерности 2.06.

2.3.4 Расчет условной дисперсии для фазовых траекторий

Предположим, что используя два временных ряда x и y мы восстановили в пространстве \mathbb{R}^{M} два псевдоаттрактора, образованные векторами Такенса x^{M} и y^{M} (каждый для своей родительской системы). Далее необходимо рассчитать среднюю условную дисперсию о по формуле (7):

$$\sigma_{xy}^{M}(\varepsilon) = \left(\frac{\sum\limits_{i\neq j} \left\|y_{i}^{M}-y_{j}^{M}\right\|^{2} \Theta\left(\varepsilon-\left\|x_{i}^{M}-x_{j}^{M}\right\|\right)}{\sum\limits_{i\neq j} \Theta\left(\varepsilon-\left\|x_{i}^{M}-x_{j}^{M}\right\|\right)}\right)^{1/2}$$
(7)

где θ - функция Хевисайда, играющая роль индикатора, ε - радиус локальной окрестности, M - размерность вложения. Название "метод условных дисперсий" обусловлено тем обстоятельством, что в формуле (7) подсчитывается дисперсия точек y^{M} при условии близости синхронных точек x^{M} .

В данном случае функция Хевисайда позволяет учитывать только слагаемые с ε -близкими точками псевдоаттрактора x^M . Близость точек измеряется евклидовым расстоянием. Накладывая на точки псевдо аттрактора x^M условие ε -близости, мы проверяем, выполняется ли это условие для точек псевдо аттрактора y^M . В основе лежит предположение, что при малых расстояниях между точками x^M , т.е. $||x_i^M - x_j^M|| < \varepsilon$, расстояние между точками y^M будет $||y_i^M - y_j^M|| \approx \varepsilon$ в случае, если x и y спродуцированы взаимосвязанными системами, и $||y_i^M - y_j^M|| \approx \Delta y^M$, где Δy^M - среднее расстояние между точками y^M , если ряды независимы друг от друга (Čenys et al., 1991).

2.3.5 Анализ результата на графике зависимости $\sigma(\varepsilon)$

Таким образом, при наличии влияния системы X на Y, на графике зависимости $\sigma(\varepsilon)$ кривая будет иметь наклон, крутизна которого определяется силой связи. Рассмотрим в качестве примера два отображения Энона, которые вводятся по формулам (8):

$$egin{cases} x_{n+1} &= 1 + y_n - 1.4 x_n^2 \ y_{n+1} &= 0.3 x_n + lpha (v_n - y_n) \ \left\{ egin{array}{ll} u_{n+1} &= 1 + v_n - 1.4 u_n^2 \ v_{n+1} &= 0.3 u_n \end{array}
ight.$$

где α - коэффициент влияния системы (u,v) на систему (x,y): т.е., чем больше α , тем сильнее (u,v) влияет на (x,y). Рассчитаем зависимость $\sigma(\varepsilon)$ для x и u при различных значениях α (0:0.01:0.06). Как видно на рисунке 2.4, кривая зависимости x от u будет изгибаться, при этом ее наклон будет тем сильнее, чем больше связь между двумя этими временными рядами. При этом кривая зависимости u от x будет горизонтальной при любых значениях α , так как u не зависит от x.



Рисунок 2.4 - График зависимости $\sigma(\varepsilon)$ для отображений Энона. При увеличении значения коэффициента связи α увеличивается наклон кривой (синие кривые зависимости *x* от *u*). В случае отсутствия связи (α =0) кривые располагаются горизонтально (красные кривые зависимости *u* от *x*).

2.4 Оценка ошибки методом Монте-Карло

В данной работе мы имеем дело с эмпирическими временными рядами, для которых доступны также ошибки их измерения. Для оценки погрешности метода условных дисперсий мы использовали метод Монте-Карло - к каждому эмпирическому ряду прибавлялся гауссовский шум, соответствующий величинам погрешностей этого ряда, и условная дисперсия рассчитывалась для зашумленного ряда. Эта операция повторялась 100 раз, и таким образом мы получали среднюю кривую зависимости σ(ε) с доверительными интервалами.

Пример такой оценки погрешности приведен на рисунке 2.5. Мы рассматриваем два временных ряда x(t) и y(t), их фрагменты приведены на рисунке 2.5а,б. К каждому из временных рядов добавляется гауссовский шум; в результате получаем их зашумленные реализации (рисунок 2.5а,б). Затем для 100 пар полученных зашумленных реализаций мы реализуем метод условных дисперсий и строим зависимость $\sigma(\varepsilon)$ для каждой пары (рисунок 2.5в). В качестве основной мы используем кривую зависимости $\sigma(\varepsilon)$ для оригинальных (не зашумленных) рядов x(t) и y(t), а кривые зашумленных рядов используем, чтобы оценить разброс значений $\sigma(\varepsilon)$ в каждой точке с помощью стандартного отклонения.



Рисунок 2.5 - Пример оценки погрешности работы метода условных дисперсий с помощью метода Монте-Карло. На подграфиках (а) и (б) изображены фрагменты временных рядов x(t) и y(t) (толстые линии), соответственно, и их зашумленные реализации (тонкие линии). На подграфике (в) изображен результат работы метода условных дисперсий с рядами x(t) и y(t) (толстые линии с кружками) и между их зашумленными реализациями (тонкие линии).

2.5 Выводы к главе 2

Метод условных дисперсий является частным случаем метода ближайших соседей. Он позволяет определить направление причинно-следственной связи и ее силу. Его можно применять к палеоклиматическим временным рядам, основываясь на их хаотической природе, что уже успешно было проделано в работе (Verbitsky et al., 2019).

Наличие в эмпирических временных рядах неизбежного шума вносит погрешность в работу метода, но ее величина достаточно мала, что позволяет ввести меру связи между временными рядами с помощью этого метода с учетом погрешности, оцененной методом Монте-Карло.

ГЛАВА 3. ВЛИЯНИЕ ИНСОЛЯЦИИ НА КЛИМАТ НА КОРОТКИХ ВРЕМЕННЫХ МАСШТАБАХ

3.1 Примеры обнаруженного соответствия между инсоляцией и климатическими рядами на коротких временных масштабах

Суждения на тему "насколько велик вклад солнечного излучения в климат?" - это вечная классика исследователей климата. Никто не отрицает, что каким-то образом Солнце должно влиять на климат, но попытки выявить солнечный сигнал и уточнить конкретные детали взаимодействия Солнце-Климат, вызывают еще большее число вопросов. В работе (Rind, 2002) автор приводит ряд несостыковок на разных временных масштабах: например, на десятилетнем масштабе глобальное потепление совершенно не совпадает с подъемом TSI.

Традиционным приемом служит диагностики связи пирсоновский коэффициент корреляции. Так, например, в работе (Soon and Legates, 2013) авторы проанализировали градиент приземных температур от полюса к экватору на промежутке времени 1880-2010 г.г. и обнаружили, что получившаяся кривая хорошо коррелирует с TSI. В работе (Lin et al., 2021) авторы обнаружили корреляцию между вариациями SST и одиннадцатилетним циклом солнечной активности. В частности, они пришли к выводу, что максимумы (минимумы) циклов солнечной активности соответствуют событиям Эль-Ниньо (Ла-Нинья). Кроме того, они предполагают, что вариации солнечного цикла могут приводить к изменениям SST в северо-восточной части Тихого океана на величины порядка $0.2^{\circ}C$

Для подтверждения гипотезы влияния теплового излучения Солнца на земной климат успешно использовались и более серьезные, чем корреляция временных рядов, методы. Так, например, для проверки предположений о существовании гелио обусловленных связей использовались физические модели климата (Stevens and North, 1996). К сожалению, достоверно неизвестно, насколько велико это влияние. Земная климатическая система является сложной во времени и пространстве, и ее реакция на внешнее воздействие определяется не только силой, но и способом воздействия солнечного форсинга. Вариации амплитуды TSI малы по сравнению с ее средним значением 1361 Вт м⁻² и составляют всего десятые доли процента. Это значит, что необходим какой-то усиления сигнала солнечной активности, чтобы его вклад в механизм климатическую систему стал заметен. В качестве решения были предложены нелинейные механизмы усиления влияния TSI в приполярных областях (Volobuev, 2014) и в тропической атмосфере и в океане (White and Liu, 2008), т.е. локальный климат в океанах может быть чувствителен к относительным вариациям TSI. Для проверки этого предположения мы диагностируем амплитуды реконструкции по временным рядам климатических индексов океана и кривой TSI на протяжении последних 120 лет методом условных дисперсий и пытаемся выявить направление причинной связи между ними.

3.2 Оценка влияния инсоляции на климатические индексы океана с помощью метода условных дисперсий

В системе океан-атмосфера существуют региональные моды климатической изменчивости, состояние которых описывается с помощью климатических индексов, таких как Североатлантическое колебание (NAO), Эль-Ниньо - Южное колебание (ENSO, в частности, NINO 3.4) и Тихоокеанское десятилетнее колебание (PDO). По этим индексам можно определить сильные изменения шаблона локального климата в океане, например, явление Эль-Ниньо. Для оценки влияния солнечной активности на океан мы рассмотрим причинную связь между временными рядами океанических индексов и рядом TSI.

3.2.1 Рассматриваемые климатические индексы

В число рассмотренных климатических индексов входят NAO, NINO 3.4 и PDO. Климатические индексы получаются путем измерения некоторых параметров океана (температуры поверхности или давления воздуха) на станциях в разных географических зонах (см. рисунок 3.1).

В частности, индекс NAO определяется как разность давлений воздуха на уровне моря - максимальное на Азорских островах (экваториальная зона 30° с.ш.) и минимальное в Исландии (полярная зона 65° с.ш.). Он отражает паттерн движения атмосферных масс в Северной Атлантике и определяет межгодовую изменчивость крупномасштабной циркуляции атмосферы в Северном полушарии (Polonskii and Sukhonos, 2019). Этот индекс характеризует перераспределение атмосферных масс между Арктикой и субтропической Атлантикой (Нестеров, 2013). Расчет индекса может производиться с помощью различных методик, в нашем случае рассматривался индекс, рассчитанный организацией Climatic Research Unit (CRU), доступный по ссылке <u>https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/nao/</u>. Также по этой ссылке можно найти подробное описание методики расчета индекса.

Индексы NINO 3.4 и PDO основаны на данных о температуре поверхности Тихого океана (SST). NINO 3.4 измеряется как аномалия SST в экваториальной зоне Тихого океана (5°с.ш.-5°ю.ш., $120^{\circ}3.$ д.- $170^{\circ}3.$ д.), а PDO охватывает большую его часть (севернее 20° с.ш.). Оба этих индекса отражают вариации локального климата в Тихом океане, в частности NINO 3.4 - один из количественных показателей наступления явления Эль-Ниньо (аномальное потепление вод экваториальной зоны Тихого океана с периодичностью от 2 до 7 лет (Воскресенская и Михайлова, 2010). Мы использовали данные NINO 3.4, полученные Physical Sciences Laboratory из NOAA. Сами данные доступны по ссылке <u>https://psl.noaa.gov/gcos_wgsp/Timeseries/Nino34/</u>, а полное описание индексов приведено в (Rayner et al., 2003).

Индекс PDO характеризует среднемесячную аномалию температуры 20° поверхности воды северной части Тихого океана (до C. Ш.), В противоположность NINO 3.4, измеряемому в экваториальной части. Когда в северной части Тихого океана наблюдается отрицательная аномалия температуры поверхности и приземного атмосферного давления на уровне моря, принято считать, что этот индекс имеет положительное значение — «теплая» фаза. Если же

ситуация складывается по обратному сценарию — «холодная» фаза (Bugaev et al., 2018). Мы использовали данные PDO, доступные по ссылке <u>https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/pdo/</u>. Подробное описание методики расчета приведено в работе (Mantua and Hare, 2002).



Рисунок 3.1 - Географические зоны измерения данных для расчета океанических индексов NAO, NINO 3.4, PDO.

В качестве временного ряда инсоляции (солнечной активности) мы рассматривали климатическую реконструкцию TSI под названием NRLTSI2, полученную совместно лабораторией университета Колорадо - Laboratory for Atmospheric and Space Physics (LASP) и лабораторией университета Вашингтона - Naval Research Laboratory (NRL). Эта реконструкция была получена путем соединения данных космических наблюдений с модельной оценкой TSI по солнечным пятнам и факелам с учетом излучения спокойного Солнца (Coddington et al., 2016).

Все вышеназванные временные ряды мы привели к равномерной временной сетке с шагом 1 месяц на промежутке времени 1901-01:2020-12, сгладили скользящим средним с окном 12 месяцев и отнормировали по формуле, указанной в разделе 2.3.1. Получившиеся временные ряды изображены на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 - Нормированные фильтрованные временные ряды солнечной активности и колебаний циркуляции океана с планками погрешностей, определенными с помощью шумовых реализаций. Показаны временные ряды (а) NAO, (b) NINO 3.4, (c) PDO, (d) Model T, (e) TSI. Цветными тенями показаны области, покрытые шумовыми реализациями временных рядов.

Мы рассматриваем временные ряды климатических индексов из разных баз данных, а также их шумовые реализации – это временные ряды с добавлением аддитивного шума, распределенного по нормальному закону с нулевым средним значением и стандартным отклонением <noise>, определенным индивидуально для каждого временного ряда. Для каждого ряда мы введем "планки погрешности" в соответствии с полученными шумовыми реализациями - верхняя планка погрешности на уровне наибольших значений амплитуд шумовых реализаций, нижняя - по тому же принципу. Оригинальными мы будем называть ряды, прошедшие все этапы обработки, кроме добавления шума, а не временные ряды в том виде, в котором они были получены из источников.

3.2.2 Оценка погрешности временных рядов

Для того, чтобы из оригинального временного ряда получить набор его вероятных шумовых реализаций, необходимо знать оценку погрешности этого ряда. В нашем случае эта погрешность была заранее известна только у одного временного ряда - TSI, т.к. авторы базы данных предоставили эти значения. Таким образом, для оставшихся временных рядов NAO, NINO 3.4 и PDO мы определили погрешности самостоятельно. Информация об этих погрешностях приведена в таблице 3.1.

3.2.2.1 NAO

Для временного ряда NAO не было приведено значений погрешности, поэтому мы оценили ее из соотношения сигнал/шум (*SNR*), полученного в работе (Hurrell and Van Loon, 1997) в табл. 1. Величина планки погрешности (1 σ) рассчитывалась по формуле (9):

$$< noise > = < signal > /\sqrt{SNR}$$
 (9)

где *<signal>* - это стандартное отклонение наблюдаемого временного ряда.

3.2.2.2 NINO 3.4

Для оценки шума во временном ряде NINO 3.4 мы используем данные из **KAPLAN** независимого источника (http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.KAPLAN/.Indices/.NINO34/). Эта база данных содержит временной ряд KAPLAN NINO 3.4 и его погрешности на промежутке времени от 1856-01 до 1991-12. Мы рассмотрели пересечение временных рядов KAPLAN и NOAA (основной ряд NINO 3.4), охватившее временной промежуток от 1901-01 до 1991-12 и обнаружили, что амплитуды этих временных рядов визуально похожи и сходны по масштабу, корреляция Пирсона R= 0.82. Поэтому мы сделали вывод, что можем рассматривать погрешность ряда КАРLAN в качестве оценки погрешности ряда NOAA. Для этого мы посчитали среднее значение погрешности ряда KAPLAN на пересечении рядов (от 1901-01 до 1991-12) – оно оказалось равным 0.21 °С. Таким образом, мы приняли

амплитуду нормально-распределенного шума постоянной на всем протяжении ряда и равной *<noise>* = 0.21.

3.2.2.3 PDO

Как было показано в (Wen et al., 2014), для индекса PDO в число основных источников неопределенностей входят выбор источника данных SST и вектора эмпирических ортогональных функций (EOF) (особенности процедуры расчета). Этот индекс разными способами вычисляется в нескольких организациях, таких как NCEI (National Centers for Environmental Information, бывший NCDC (National Climatic JMA Data Center)) И (Japan Meteorological Agency) https://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/elnino/decadal/pdo.html, а также ряде других. Индексы PDO из разных источников визуально похожи, но в некоторые моменты времени кардинально отличаются. Так было, например, зимой 2013-2014 года, когда индексы разных организаций показывали противоположные фазы PDO одновременно. В связи с этим, для оценки неопределенности ряда PDO мы использовали два различных расчета из вышеназванных организаций. Мы оценили модуль разницы между этими индексами по формуле (10) из предположения, что истинное значение индекса с вероятностью 99,7% лежит в промежутке между ними:

$$|PDO(NCEI) - PDO(JMA)| = 3 < noise >$$
(10)

Таблица 3.1 - Сведения о погрешностях временных рядов климатических индексов.

Индекс	Источник погрешности	Погрешность во времени
NAO	Эта работа, (Hurrell and Van Loon, 1997)	меняется
NINO 3.4	Эта работа, база данных KAPLAN	постоянная
PDO	Эта работа, база данных ЈМА	меняется
TSI	(Coddington et al., 2016)	меняется

3.2.3 Концептуальная модель взаимодействия океана и атмосферы

Для определения наличия и направления связи между двумя временными рядами мы используем метод условных дисперсий (см. глава 2). Прежде чем применять его непосредственно к эмпирическим временным рядам, необходимо откалибровать его работу на некоторой идеализированной модели, поскольку ни один из известных методов определения причинных связей не является универсальным (см., напр. (McCracken, 2016)). Роль такой идеализированной модели в нашем случае будет выполнять концептуальная модель взаимодействия океан-атмосфера (Jin, 1997), которая, по словам автора, хорошо отображает динамику Эль-Ниньо - Южного колебания и вводится через уравнения (12, 13). В этой модели в качестве одной из переменных выступает аномалия температуры поверхности воды, усредненная по восточной части экваториальной зоны Тихого океана (Model T, см. рисунок 3.2d). Эта переменная в какой-то мере может считаться аналогом тихоокеанских индексов NINO 3.4 и PDO, поэтому мы используем эту модель для калибровки метода. Мы добавили в модель форсинг в TSI orig, *TSI*, который мы получили, нормировав ряд виде ряда взятый непосредственно из базы данных, по формуле (11):

$$TSI = (TSI_{orig} - min(TSI_{orig})) / < TSI_{orig} >$$
(11)

с масштабирующим коэффициентом *S*, а затем рассмотрели полученный в результате интегрирования уравнений (12, 13) ряд *Model T* и временной ряд форсинга *TSI*.

$$dT/dt = RT + \gamma h - e_n (h+bT)^3 + S^*TSI$$
(12)

$$dh/dt = -rh - \alpha bT \tag{13}$$

Здесь h - аномалия глубины термоклина в западной части Тихого океана, $R = \gamma b - c$, $\gamma = 0.75$, $e_n = 1$, b = 1.625, S = 0.01, $\alpha = 0.125$, r = 0.25, c = 1. Начальные условия Model T = 0.05, h = 0.

Чтобы проверить чувствительность метода к шуму в данных, мы добавили в полученный ряд *Model T* нормально распределенный шум с <noise> = 0.5 <signal>.

Это значение мы подобрали исходя из желания сделать шум в модельном ряде соответствующим таковому в эмпирических рядах (NINO 3.4, PDO). Мы получили, что метод может определить влияние временного ряда *TSI* на *Model T* даже при наличии шумов в данных (см. рисунок 3.3а).

3.2.4 Расчет MCD для TSI и климатических индексов

Для оценки влияния шумов в данных на результат работы метода мы Монте-Карло: использовали метод ДЛЯ каждого временного ряда ΜЫ рассматривали 100 шумовых реализаций, т.е. к оригинальному ряду прибавляли нормально распределенный шум со стандартным отклонением, оцененным для индивидуально. Анализируя статистику 100 кривых $\sigma(\varepsilon)$. каждого ряда полученных из рассмотренных шумовых реализаций, мы можем оценить влияние шума в данных на кривые. Мы обнаружили, что при зашумлении оригинального временного ряда кривые $\sigma(\varepsilon)$ поднимаются выше на графике, т.е. наличие шума в данных уменьшает возможность детектировать причинные связи. Это объясняется тем, что между полностью шумовыми рядами нет связи и $\sigma(\varepsilon) = 1$ для любого ε . Но при этом при частичном зашумлении множество зашумленных кривых $\sigma(\varepsilon)$ одного ряда сохраняет свои тенденции относительно кривых второго ряда: зашумленные кривые независимого ряда располагаются на графике выше зашумленных кривых ряда, на который оказывалось влияние. Например, на рисунке 3.3а оригинальная красная кривая влияния TSI на Model T располагается выше синей оригинальной кривой противоположного влияния. Это говорит нам о том, что между оригинальными рядами, не отягощенными дополнительными шумами, наблюдается причинная связь: TSI влияет на Model T. В то же время в случае зашумленных кривых, эта связь тоже наблюдается - красные зоны погрешности работы метода для зашумленного TSI располагаются выше аналогичных синих для Model T.

На рисунке 3.3 отображены результаты работы метода для модельного ряда, климатических рядов и TSI. На подграфиках рисунка 3.3a,b,c,d мы можем видеть,

что оригинальная кривая TSI проходит выше второй оригинальной кривой, т.е. и в модельном, и в эмпирическом случаях TSI оказывает влияние на другие временные ряды, а не наоборот. Также можно заметить, что взаимное расположение оригинальных кривых на рисунках 3.3a, b, с выглядит практически идентичным. Это объясняется тем фактом, что рассмотренная нами модель была колебаний воспроизведения температуры написана ДЛЯ поверхности экваториальной части Тихого океана, которые можно отследить с помощью индексов NINO 3.4 и PDO (рисунки 3.3b и 3.2c, соответственно). Похожая картина в результатах работы метода в данном случае была ожидаемой. Так же ведут себя и шумовые кривые на этих рисунках - красные тени располагаются выше синих при значениях log2(ϵ) \geq -5 \div -4. При меньших значениях log2(ϵ) метод начинает работать некорректно, т.к. размер є-шариков, в которых ведется расчет точек фазового пространства, становится слишком мал и корректно интерпретировать результаты расчетов уже нельзя. Поэтому результатами работы метода для маленьких є можно пренебречь, если ряды недостаточно длинные и не могут дать большого количества точек в фазовом пространстве.

От рассмотренного выше визуально отличается ход оригинальных кривых на рисунке 3.3d: там тоже можно проследить влияние TSI на NAO для оригинальных кривых, но шумовые реализации не подтверждают этот результат. Шумовые тени NAO и TSI полностью перекрывают друг друга и выявить направление связи не представляется возможным.

В случае пар временных рядов NAO - NINO 3.4 и PDO - NINO 3.4 (рисунок 3.3e,f) мы также сталкиваемся с затруднениями. В паре NAO - NINO 3.4 оригинальная кривая NINO 3.4 идет выше NAO, но только в левой части графика, где повышается вероятность некорректной работы метода. Кроме того, шумовые реализации этих рядов пересекаются, т.е. чувствительность метода к шуму не позволяет ему сделать выводы относительно NAO и TSI. В случае PDO и NINO 3.4 наблюдается явление синхронизации временных рядов, поэтому выявить

направление причинной связи нельзя. Оригинальные кривые, как и зоны шумовых реализаций, практически полностью совпадают на рисунке 3.3f.



Рисунок 3.3 - Результат работы метода для пар временных рядов. Графики кривых $\sigma(\epsilon)$ для временных рядов (a) Model T и TSI, (b) NINO 3.4 и TSI, (c) PDO и TSI, (d) NAO и TSI, (e) NAO и NINO 3.4, (d) PDO и NINO 3.4. Сплошными линиями с кружками отмечены кривые $\sigma(\epsilon)$ для оригинальных временных рядов. Тенями соответствующих цветов показаны погрешности работы метода при зашумлении оригинальных рядов, т.е. показаны пределы, в которых варьируются результаты работы метода для зашумленных временных рядов.

3.3 Выводы к главе 3

С помощью метода условных дисперсий мы оценили причинную связь между парами эмпирических и модельных временных рядов (рисунок 3.3). В качестве калибровочной упрощенной физической модели была рассмотрена концептуальная модель океан-атмосфера (Jin, 1997), а для проверки работы метода при наличии шума в данных использовался метод Монте-Карло. Мы получили, что добавление шума в любой временной ряд, включая модельный, приводит к поднятию кривых на графике и их более горизонтальному положению, т.е. шум уменьшает детектируемость причинной связи между временными рядами.

Метод условных дисперсий показал, что TSI влияет на NINO 3.4 и PDO. Детектировать связь между NAO и TSI, NINO 3.4 и NAO этим методом не удалось, т.к. оценки условной дисперсии для зашумленных рядов не позволяют определить наличие причинной связи. Индексы NINO 3.4 и PDO синхронизированы, т.к. оба относятся к Тихому океану, поэтому для них нельзя определить направление причинной связи.

ГЛАВА 4. ПРОГНОЗ ДЕКАДНЫХ СРЕДНИХ TSI В ПЕРИОД 25-ГО СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА

При прогнозировании солнечного цикла используются две условные категории прогностических методов - т.н. статистические ("методы статистической экстраполяции") и прекурсорные ("метод предвестников"). Первые основаны на уже имеющейся информации о предсказываемой величине. Мы предполагаем, что характер изменений этой величины сохраняется во времени и возможно его предсказать, используя статистический подход. Например, для прогноза временного ряда чисел Вольфа используется сам этот ряд.

Вторые (прекурсорные) используют дополнительную информацию из других источников, которые характеризуют интересующее нас явление или косвенно указывают на его предстоящие изменения.

В этой главе мы будем использовать статистический метод прогноза для реконструкции TSI. В рамках задачи прогноза солнечного цикла как правило используется временной ряд солнечных пятен, прогнозов для TSI гораздо меньше. Между тем, именно TSI является основополагающей величиной для расчета инсоляции, и, как следствие, участвует в построении климатических моделей в качестве форсинга. Таким образом, реконструкция и прогнозирование ряда TSI – одна из самых актуальных на данный момент научных проблем. В этой главе мы рассмотрели несколько реконструкций TSI, основанных на данных о космогенных изотопах ¹⁴С и ¹⁰Ве, солнечных пятнах (раздел 4.2), и оценили их качество с точки зрения нелинейной динамики. Для оценки качества мы тестировали их предсказуемость модифицированным методом аналогов для одношагового прогноза огибающей (декадных средних) (Lorenz, 1969), метод описан в разделе 4.1. Таким образом мы смогли выбрать наиболее качественную, в смысле прогнозируемости, реконструкцию и использовали ее для прогноза амплитуды TSI в 25-м цикле солнечной активности.

4.1 Метод аналогов Лоренца

В этой главе использовался метод прогноза хаотических временных рядов, предложенный в работе (Farmer and Sidorowich, 1987). Он основан на реконструкции динамики из одномерного ряда по теореме Takenca (Takens, 1983), т.е. получения пространства вложения запаздывающих координат. В этом пространстве вектор координат каждой точки представляет собой временной паттерн (аналог), записанный в истории ряда. Задача прогноза, таким образом, сводится к нахождению продолжения современного временного паттерна по историческими паттернами. Прогнозируемость аналогии с известными реконструкции числа пятен этим методом была показана panee (Volobuev and Makarenko, 2008) и использована для прогноза 24-го солнечного цикла (Volobuev, 2009).

Идея Лоренца заключалась в поиске "аналогов" - похожих шаблонов во временном ряде, в качестве прогноза выбиралось продолжение наиболее похожего паттерна (Lorenz, 1969). В работе (Farmer and Sidorowich, 1987) было предложено получать прогноз, используя локальную линейную аппроксимацию в реконструкции по Такенсу. В модификации метода (Volobuev and Makarenko, 2008) предсказываются не сами значения ряда, а его конечные разности, что позволяет избежать влияния автокорреляций.

При построении реконструкции по Такенсу каждая точка в фазовом пространстве будет отображать аналог (непрерывный кусок временного ряда), причем размерность фазового пространства равна длине аналога. Например, при размерности фазового пространства m=3, каждой точке этого пространства соответствует аналог длиной в 3 последовательные точки ряда. В этом фазовом пространстве наиболее похожими аналогами будут наиболее близкие в смысле Евклидова расстояния точки пространства.

Таким образом, работа метода сводится к поиску аналога, наиболее похожего на конечный фрагмент прогнозируемого временного ряда. В частности, при длине аналога = 3, мы рассматриваем три последние точки временного ряда,

строим фазовое пространство, находим 4 наиболее близкие точки в фазовом пространстве, смотрим на продолжения этих аналогов (наиболее похожих отрезков временного ряда), строим линейную модель и делаем прогноз следующего значения временного ряда.

Необходимым предположением при использовании этого метода является наличие низкоразмерной хаотической составляющей во временном ряде. В нашем случае речь идет о реконструкциях TSI, где присутствует значительное количество шумов различной природы. При наличии шумов определение корреляционной размерности (см. раздел 2.3.3) теоретически затруднено из-за увеличения наклонов корреляционных интегралов в области малых масштабов. В нашем случае оно практически невозможно из-за наличия долгопериодических (цветных) шумов, обусловленных, например, ошибками реконструкции геомагнитного поля, которая искажает корреляционный интеграл также и в средних и больших масштабах. В этом случае предположение о низкой размерности обосновано ограниченностью фазового пространства и отсутствием самопересечений восстанавливаемой траектории, что может быть достигнуто уже для размерности m = 3, а увеличение размерности приводит лишь к ухудшению прогноза (Volobuev and Makarenko, 2008).

4.1.1 Описание алгоритма метода

Рассмотрим временной ряд c_k , для которого нам необходимо сделать прогноз его следующего значения c_0 . Введем ряд конечных разностей $D_k = c_k - c_{k-1}$. Далее построим фазовое пространство D по формуле (14):

$$D_1 \quad D_4 \quad \dots \quad D_{\left[\frac{N}{m}\right]-m+1}$$

$$D = D_2 \quad D_5 \quad \dots \quad D_{\left[\frac{N}{m}\right]-m+2}$$

$$D_3 \quad D_6 \quad \dots \quad D_{\left[\frac{N}{m}\right]}$$

$$(14)$$

где столбцы - это аналоги, m - размерность пространства (длина аналога), N длина временного ряда (обучающей выборки), а нумерация D идет из настоящего в прошлое. Далее выбираем m+1 самых близких аналогов (А) по принципу наименьших расстояний между ними. Строим линейную модель и находим коэффициенты регрессии g по формуле (15):

$$A^{t}g = X^{t}, \quad -\sigma < g_{i} < \sigma, \quad \sigma = < D >$$
(15)

После этого рассчитываем прогноз искомого значения конечных разностей D_0 и самой амплитуды c_0 по формуле (16):

$$D_{0} = \sum_{i=1}^{m+1} g_{i} D_{i}, \quad c_{0} = c_{1} + D_{0}$$
(16)

Полученное значение c_0 и будет искомым значением одношагового прогноза модифицированным методом аналогов Лоренца. Код MATLAB, реализующий данный метод, доступен по ссылке https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/17276-constrained-llato-predic t-a-chaotic-time-series

4.2 Однородность реконструкций и качество прогноза

Реконструкции TSI отличаются использованием разных прокси, а также вспомогательных данных и моделей. Важно отметить, что реконструкции TSI не учитывают долгопериодических вариаций, связанных с изменением параметров орбиты Земли. В этом разделе мы рассмотрим 3 реконструкции TSI, для которых в качестве прокси выступили содержание ¹⁴С в кольцах деревьев, ¹⁰Ве в ледяных кернах и число солнечных пятен.

4.2.1 Реконструкции, их источники и масштабирование, выполнение прогноза для нескольких реконструкций на тестовых выборках

Как уже говорилось ранее, в этой главе будут рассмотрены 3 реконструкции TSI. Первая ((Vieira et al., 2011), далее VEA11) реализована для временного отрезка 9495 лет до н.э. – 2007 г. по содержанию радиоуглерода в кольцах деревьев (9495 лет до н.э. – 1640 г.), наблюдениям солнечных пятен (1640–1974 гг.) и магнитограммам солнечного диска (1974–2007 гг.). Разрешение данных – суточные на промежутке (1640–2007 гг.) и десятилетние для (9495 лет до н.э. – 1640 г.), см. рис. 4.1. Вариации амплитуды не превышают 2 Вт м⁻² для реконструированного по радиоуглероду и достигают 7 Вт м⁻² для современного участка. Последняя величина не соответствует рисунку 4.1, т.к. исходный ряд VEA11 был изображен от начала реконструкции до 1640 года, а с 1640 до 2007 года приведены среднегодовые значения, рассчитанные по исходному ряду.

Вторая рассмотренная реконструкция RJ13 (Roth and Joos, 2013) реализуется по данным о солнечном потенциале, полученным с помощью модели Bern3D-LPJ на основе атмосферного радиоуглеродного ряда (см. рисунок 4.1). Она имеет шаг по времени в 1 год и продолжительность 8050 лет до н.э. – 2005 г. Вариации TSI сглажены сплайном и не превышают 2.5 Вт м⁻².

Третья рассмотренная реконструкция – DB10 из работы (Delaygue and Bard, 2011) использует в качестве прокси содержание ¹⁰Ве в антарктических ледяных кернах со станции Купол Фуджи и Южного полюса. Она имеет продолжительность с 695 г. до 1982 г. с различным шагом по времени (от 6 до 15 лет, в среднем 10 лет). В этом случае вариации TSI не превышают 1.5 Вт м⁻².



Рисунок 4.1 - Исходные ряды рассмотренных реконструкций TSI. Данные (Vieira et al., 2011) (внизу) приведены в исходном виде не полностью – участок с 1640 по 2007 год приведен в виде годичных средних, а не суточных, чтобы сохранить пропорции осей для всех реконструкций. Данные по работам (Delaygue and Bard, 2011) (вверху) и (Roth and Joos, 2013) (посередине) оригинальные.

Все реконструкции получены авторами в масштабе Old VIRGO scale, который предполагает, что среднее значение TSI находится в пределах 1365–1366 Вт м⁻². Несмотря на это, средние значения рядов не совпадают. Ряд DB10 имеет среднее значение меньше, чем остальные, а VEA11, в свою очередь, меньше, чем RJ13. Этот факт не отслеживается на рисунке 4.1, так как каждый ряд привязан к отдельной оси, но заметен на рисунке 4.2.

При попытке прогнозирования ряда VEA11, составленного из исходных декадных значений (до 1640 г.) и посчитанных нами десятилетних средних (после 1640), мы обнаружили, что наличие второй части ряда (после 1640 г.), восстановленной по пятенному ряду и спутниковым наблюдениям, делает прогноз невозможным (см. раздел 4.2.2 и таблицу 4.1), в то время как при ее отсутствии он

осуществляется. Поэтому мы рассмотрели возможность дополнения ряда VEA11 до 1640 г. современным участком из другой реконструкции.

Описанные выше реконструкции были приведены к сетке 1645:10:1975 гг. (середины десятилетий) с помощью различных процедур. Для ряда RJ13 были рассчитаны декадные средние, а ряд DB10 сглаживался сплайном с коэффициентом p=1/(1+10³/9). Затем был произведен их линейный сдвиг так, чтобы их максимумы в точке 1365 г. совпали со значением максимума VEA11 (см. рисунок 4.2, серое поле).

Данная точка была выбрана из соображений наибольшего удобства приведения данных к единой шкале, т.к. для этого максимума во всех 3 случаях не было сдвига по времени или различий по форме, что позволило использовать его как репер. DB10 переводился прибавлением значения 0.34 Вт м⁻², а RJ13 – вычитанием значения 0.21 Вт м⁻². Эти величины составляют не более, чем 0.03% от среднего значения TSI. Затем ряд VEA11 до 1640 года был состыкован с модифицированными рядами DB10 и RJ13. Полученные композитные ряды в дальнейшем будем называть VDB10 и VRJ13.



Рисунок 4.2 - Реконструкции TSI в едином масштабе на участке 1205–1975 гг. Прерывистой кривой показаны десятилетние средние современной части ряда (Vieira et al., 2011). Вертикальная прямая разделяет ось времени на участки до и после 1640 г. Части реконструкций справа от этой прямой пришивались к

исходному ряду (Vieira et al., 2011) для получения композитных кривых. Серым полем отмечен максимум на 1365 год между минимумами Вольфа и Шперера, который использовался для совмещения рядов по амплитуде с реконструкцией (Vieira et al., 2011).

4.2.2 Оценка точности прогноза

Прогнозирование осуществлялось методом аналогов, который описан в разделе 4.1. Для сдвиговой реконструкции в рамках данного метода была выбрана размерность вложения M = 3, а величина сдвига t = 10 лет (1 шаг).

Чтобы сделать выводы о точности, было выполнено 100 независимых прогнозов на обучающих выборках различной длины. Размер этих выборок варьировался от минимального 9495 до н.э. – 965 г. до максимального 9495 до н.э. – 1975 г. добавлением одной точки с шагом в 10 лет. На рисунке 4.3 приведены результаты 35 независимых прогнозов точек на промежутке 1635 г. – 1975 г. На этом рисунке видно, что предсказанные значения VEA11 являются менее гладкими, чем в других случаях, а с 1900 по 1950 г. идут в противофазе с настоящими.



Рисунок 4.3 - Прогнозы значений TSI для 3 композитных кривых на интервале 1635–1975 гг. По осям ординат приведены значения TSI, Вт м⁻². Тонкой линией

обозначены реальные значения TSI, толстой – предсказанные на очередной итерации прогноза. Изображены ряды (снизу вверх): (Vieira et al., 2011) (VEA11), сшитый ряд (Vieira et al., 2011) до 1640 г. и (Roth and Joos, 2013) после 1640 г. (VRJ13), сшитый ряд (Vieira et al., 2011) до 1640 г. и (Delaygue and Bard, 2011) после 1640 г. (VDB10).

В качестве критерия точности прогноза был выбран параметр $E = std(\delta c_{test})/std(c_{training})$, где $c_{training}$ – конечные разности минимальной обучающей выборки, а δc_{test} – разница между реальными и предсказанными значениями конечных разностей на тестовых выборках. Также был рассчитан коэффициент корреляции Cv между реальными и предсказанными значениями самого ряда для всех независимых прогнозов. Те же параметры оценивались для т.н. инерционного прогноза, предполагающего, что в следующей точке будет то же значение, что и в предыдущей. Величина $W = (Cv - Cv_{unepu})/abs(Cv_{unepu})$ характеризует, насколько прогноз методом аналогов лучше, чем инерционный.

В таблице 4.1 приведены результаты прогноза 4 композитных рядов. Для ряда VEA11 (9495 до н.э. – 1975 г.), в котором использовалась только 2011), W реконструкция (Vieira et al., величина отрицательная, т.е. прогнозирование не реализуется. Та же самая картина наблюдается, если часть ряда VEA11 с 1640 г. по 1975 г. посчитать не как декадные средние, а используя медианный фильтр или сглаживание сплайном, т.е. различные методики получения декадных значений из суточных не приводят к улучшению ситуации. В случае композитных рядов VRJ13 и VDB10 выигрыш по сравнению с инерционным прогнозом одинаковый – 0.04, но достаточно малый. При этом ошибка прогноза Е в обоих случаях примерно одинаковая и меньшая, чем для инерционного прогноза, но для ряда VRJ13 разница между ними достигает наибольшего значения.

Если считать, что при положительном W прогноз ряда осуществляется, а при отрицательном – нет, можно сделать вывод, что композитные ряды VRJ13 и
VDB10 прогнозируются с небольшой точностью, в то время как ряд VEA11 не прогнозируется вообще. Последний мы также рассмотрели на более коротком промежутке времени (9495 г. до н.э. – 1635 г.), где он реконструировался только по радиоуглеродным данным и является однородным (VEA11c). В данном случае 100 независимых прогнозов показали большую точность, чем для предыдущих композитных рядов. В частности, W = 0.07, что является наибольшим выигрышем относительно инерционного прогноза среди рассмотренных, а E = 0.58 - самаямаленькая ошибка прогноза. Этот факт позволяет сделать вывод, что часть значений реконструкции VEA11 ОТ 1640 Г. современных ДО вносит В прогноз. Источником этой неопределенности неопределенность может выступать, например, использование числа солнечных пятен в качестве прокси на этом участке. Пятенная активность может отслеживаться в виде различных параметров (числа Вольфа, число групп пятен), приведение которых на историческом интервале к единой системе наблюдений не ясно до конца и является предметом продолжающейся дискуссии (напр., Lockwood et al. 2016), которая вылилась, в частности, в перекалибровку ряда числа солнечных пятен и появлению версии v2.0 (Clette et al., 2014), принятой в настоящее время. По всей видимости, важную роль в точности прогноза имеет однородность данных, в кривые VRJ13 И VDB10 являются частности, композитные полностью восстановленными по космогенным изотопам, в отличии от VEA11.

Ряд	Длительность, г.	E (1)	<i>Е</i> _{инерц} (2)	Cv (3)	<i>Сv</i> _{инерц} (4)	W (5)
VEA11	-9495:10:1975	0.90	0.97	0.91	0.92	-0.01
VRJ13	-9495:10:1975	0.69	0.85	0.93	0.89	0.04
VDB10	-9495:10:1975	0.67	0.76	0.94	0.9	0.04
VEA11c	-9495:10:1635	0.58	0.75	0.95	0.89	0.07

Таблица 4.1 - Параметры прогноза композитных рядов.

(1) Параметр Е показывает точность прогноза методом аналогов; (2) E_{unepu} – инерционного; (3) Cv – коэффициент корреляции между настоящими и предсказанными методом аналогов значениями; (4) Cv_{unepu} – аналогично для инерционного прогноза; (5) W показывает, насколько прогноз методом аналогов лучше инерционного.

Таким образом, тестирование показало, что временной ряд (Vieira et al., 2011) с 9495 г. до н.э. по 1975 г., составленный с помощью различных прокси, не предсказывается, в то время как его восстановленная по космогенному изотопу часть предсказывается довольно хорошо. Хуже прогнозируются композитные кривые, составленные из указанной выше части ряда (Vieira et al., 2011) и других рядов (Roth and Joos, 2013) и (Delaygue and Bard, 2011). Таким образом, реконструкции TSI, восстановленные по космогенным изотопам, хорошо прогнозируются, так как они не вносят дополнительной неоднородности, связанной со сшивкой моделей, основанных на разнородных данных.

Из факта прогнозируемости следует (Sugihara and May, 1990), что реконструкции TSI, основанные на космогенных изотопах, т.н. однородные реконструкции, содержат нелинейную детерминированную составляющую, позволяющую прогнозировать эти ряды, что подтверждает наличие долговременной памяти (Volobuev & Makarenko, 2008). При этом вопрос о корректности и согласованности долговременных реконструкций TSI в настоящее время остается открытым.

4.2.3 Выбор однородной реконструкции для прогноза

Для выполнения прогноза 25-го солнечного цикла в терминах TSI необходимо подобрать подходящую реконструкцию из числа однородных. Так как большинство реконструкций содержит в себе очень сглаженные значения, а также длится недостаточно долго и не включает в себя данные современных

космических наблюдений (см. рисунок 4.4), мы будем продолжать выбранную в итоге реконструкцию композитным рядом TSI RMIB (см. раздел 1.3.3).

На рис. 4.4 видно, что сильно сглаженные реконструкции (Steinhilber et al., 2009; Roth and Joos, 2013) хорошо соответствуют друг другу, но не допускают прогноз десятилетних средних, т.к. их окно сглаживания имеет длительность порядка 20 и 40 лет, соответственно. В то же время реконструкция (Egorova et al., 2018) не сглажена, хорошо воспроизводит вариации десятилетнего цикла в эпоху космических наблюдений и допускает нетривиальный прогноз последнего значения. Реконструкция (Vieira et al., 2011) на этом временном отрезке представлена рядом не сглаженных космических наблюдений и приведена для примера.



Рисунок 4.4 - Композитные ряды наблюдений TSI (ACRIM, RMIB) и однородные реконструкции TSI (Steinhilber et al., 2009; Vieira et al., 2011; Roth and Joos, 2013; Egorova et al., 2018) на протяжении 21-24 солнечных циклов.

Рассмотрим подробнее приведенные однородные (кроме VEA) реконструкции TSI. На рисунке 4.5 приведены полные временные ряды вышеназванных реконструкций.

Реконструкции (Vieira et al., 2011) и (Roth and Joos, 2013) уже были описаны выше. Реконструкция (Egorova et al., 2018) была восстановлена по числу солнечных пятен и космогенным изотопам во льду, она характеризуется большей, чем у других реконструкций, амплитудой вариаций (вплоть до 8 Вт м⁻²), имеет продолжительность от 6757 г. до н.э. до 2016 г. с шагом в 1 год. Реконструкция (Steinhilber et al., 2009) также была восстановлена по содержанию бериллия-10 во льду, имеет продолжительность от 7363 г. до н.э. до 2008 г. с шагом в 5 лет, но при этом ряд представлен в виде 40-летних средних с амплитудой вариаций меньше 2 Вт м⁻².



Рисунок 4.5 - Реконструкции TSI в голоцене по содержанию ¹⁰Ве в полярных льдах (Steinhilber et al., 2009; Egorova et al., 2018) и радиоуглерода в годичных кольцах деревьев (Vieira et al., 2011) и атмосфере (Roth and Joos, 2013).

Далее мы произвели прогноз для перечисленных реконструкций, используя ту же процедуру, что и в разделе 4.2.2. Сведения о реконструкциях и результатах прогноза приведены в таблице 4.2. Максимальная точность прогноза принадлежит ряду (Steinhilber et al., 2009) (W = 0.06), однако этот ряд состоит из 40-летних средних и, несмотря на высокую точность прогноза, корректно показать прогноз для 10-летних средних он не сможет. По этой причине мы выбрали ряд (Egorova et al., 2018) для дальнейшего прогнозирования 25-го солнечного цикла в терминах декадных средних.

Таблица 4.2 - Параметры прогноза однородных композитных рядов и ряда (Vieira et al., 2011). (1) Параметр Е показывает точность прогноза методом аналогов; (2) E_{unepy} – инерционного; (3) Cv – коэффициент корреляции между настоящими и предсказанными методом аналогов значениями; (4) Cv_{unepy} – аналогично для инерционного прогноза; (5) W показывает, насколько прогноз методом аналогов лучше инерционного.

Ряд	Длительность, г.	E(1)	Е _{инерц} (2)	Cv (3)	Сv _{инерц} (4)	W (5)
Egorova et al., 2018	-6745:10:1995	0.89	1.06	0.97	0.93	0.04
Steinhilber et al., 2008	-6745:10:1995	0.72	0.90	0.92	0.86	0.06
Roth and Joos, 2013	-6745:10:1995	1.07	1.17	0.87	0.87	0.00
Vieira et al., 2011	-6745:10:1995	0.94	1.00	0.91	0.92	-0.01

4.3 Прогноз выбранной реконструкции

Для реализации прогноза был выбран временной ряд реконструкции (Egorova et al., 2018) + композитные данные наблюдений RMIB. Декадные средние ряда были рассчитаны для периода времени 6745 г. до н.э. - 2013 г., включая современные данные до 2018 г. Данные современных наблюдений RMIB были поделены на 1,001756 для приведения ряда к шкале TIM/SORCE. Результаты прогноза представлены на рисунке 4.6.



Рисунок 4.6 - Нелинейный прогноз декадной средней TSI. (а) Прогнозы на тестовой выборке. Сплошной черной кривой с квадратиками показаны значения прогнозов методом аналогов, пунктирной серой кривой с кружками - точки оригинального временного ряда. Прогнозируемый уровень декадной средней TSI (с центром в 2023±5 г.) показан сплошной серой горизонтальной линией для сравнения с исторической записью. Пунктирной серой горизонтальной линией отмечен наименьший возможный прогнозируемый уровень в случае максимальной ошибки прогноза -1.2 Вт м⁻². Вставка (b) показывает увеличение участка графика (а), содержащего предсказанное значение.

Оценка прогноза на один шаг вперед (для декады 2023 г. ± 5 лет) для последних 100 значений декадных средних показывает некоторое снижение TSI в будущем десятилетии (рисунок 4.6b) до значения 1360.3 Вт м⁻². Несмотря на эту тенденцию к снижению, маловероятно, что TSI достигнет уровня минимумов Маундера или Дальтона. Более того, предсказанное значение по уровню соответствует средневековому максимуму (1100 - 1250 г.г.).

Распределение абсолютных ошибок прогноза (рисунок 4.7) показывает выигрыш над инерционным прогнозом и статистическую вероятность прогнозируемого снижения TSI по сравнению с фактическими значениями за последние 1000 лет.





Сплошными линиями показаны аппроксимации данных с помощью нормального распределения. Видно, что у метода аналогов стандартное отклонение ошибок прогноза меньше по сравнению с инерционным прогнозом, что показывает, что нелинейный прогноз работает в статистическом смысле.

Таким образом, мы предполагаем, что в следующей декаде (2023±5 лет) среднее значение TSI будет равным 1360.3 Вт м⁻². Уровень TSI, вероятно, останется ближе к средневековому максимуму (1100-1250 г.г.) в ближайшие десятилетия, что далеко от какого-либо большого минимума.

4.4 Сравнение разных прогнозов

Обзор прогнозов предыдущих солнечных циклов для солнечных пятен можно найти в работах (Usoskin and Mursula, 2003) для 22-го солнечного цикла, (Pesnell, 2012, 2016) для 24-го солнечного цикла, (Li et al., 2001) для 23-го солнечного цикла. Обзор прогнозов амплитуды 25-го солнечного цикла в солнечных пятнах доступен в работе (Nandy, 2021) и включает в себя три прогноза, выполненных нелинейными методами. В частности, в работе (Sarp et al., 2018) был реализован прогноз нелинейным методом, основанным на временном запаздывании и реконструкции фазового пространства, и было получено, что 25-й цикл будет выше 24-го. (Kitiashvili, 2020) применила метод ансамблевого фильтра Калмана для прогнозирования солнечных циклов с использованием нелинейной системы уравнений, предназначенной для имитации усеченной модели динамо среднего поля, и получила, что амплитуда 25-го цикла будет практически в 2 раза меньше амплитуды 24-го цикла. В работе (Sello, 2019) для прогноза использовался метод нелинейной динамики, подробно описанный в более ранних работах автора, было получено, что 25-й цикл по амплитуде будет немного ниже 24-го, но очень близок к нему.

Конкретно для значений TSI прогнозов делается гораздо меньше, т.к. основным маркером солнечной активности принято считать солнечные пятна. В число прогнозов TSI входит результат работы (Velasco Herrera et al., 2015), где,

принимая во внимание 120-летнюю периодичность (цикл Гляйссберга) солнечной активности, авторы получили, что в 2004-2075 гг. нас ждет очередной гранд-минимум со средним значением TSI = 1360.5 ± 0.9 Вт м⁻². К идее гранд-минимума в 21 веке также склоняются (Tlatov and Pevtsov, 2017): полагая, что магнитная активность Солнца в основном определяется 200-летней вариацией (цикл Зюсса), они предсказали следующий гранд-минимум примерно в 2090 году.

Кроме того, в работе (Abdussamatov, 2020) также предполагается снижение максимума амплитуды TSI в 25-м цикле примерно на 1.8 Вт м⁻² по сравнению с максимумом 24го цикла. При этом наши результаты не показывают подобного значительного снижения уровня TSI в следующем цикле: уровень TSI, вероятно, останется ближе к значению 1360.3 Вт м⁻², снизившись всего на 0.4 Вт м⁻². Наши результаты не предполагают наличия какого-либо гранд-минимума.

4.5 Выводы к главе 4

В этой главе мы рассмотрели несколько реконструкций TSI, основанных на данных о космогенных изотопах - радиоуглероде и ¹⁰Ве, солнечных пятнах, и оценили их качество с точки зрения нелинейной динамики. Для оценки качества мы тестировали их предсказуемость модифицированным методом аналогов для одношагового прогноза огибающей (декадных средних).

Мы получили, что качество прогноза TSI ухудшается, если рассматривать композитный ряд, составленный по различным источникам данных. В частности, части которой были для реконструкции, различные восстановлены ПО космогенному изотопу, количеству солнечных пятен, а также по данным современных спутниковых наблюдений, метод аналогов не работает. Но при этом он работает для реконструкций, восстановленных по космогенным изотопам на всем протяжении ряда. Таким образом, мы получили, что прогнозируемость рядов показывает нам наличие нелинейной детерминированной составляющей и является одним из критериев качества реконструкций. Этот подход, основанный на точности нелинейного прогноза, может быть использован в дальнейшем для оценки качества реконструкций.

Мы выполнили прогноз декадной средней TSI в 25-м солнечном цикле с помощью метода аналогов Лоренца на основе реконструкции TSI, выполненной по одному длительному ряду прокси, включающему все типичные состояния соответствующей динамической системы на протяжении Голоцена. Точность прогноза была оценена по эпигнозу и сравнивалась с инерционным прогнозом. По нашим оценкам, в следующем 25-м цикле солнечной активности следует ожидать умеренный спад амплитуды (на 0.4 Вт м⁻²) и значение десятилетнего среднего TSI будет соответствовать средневековому максимуму по величине (1360.3 Вт м⁻²). Основной вывод: полученный сценарий не предполагает наличие гранд-минимума в следующем десятилетии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем диссертационном исследовании проведен анализ влияния двух составляющих инсоляции – (1) орбитальной и (2) обусловленной СА - на изменения климата на разных временных масштабах: десятки тысяч, сотни, десятки лет.

Основные полученные в работе результаты:

- Была вычислена инсоляция во время Голоцена (11 тыс. лет) с учетом вариаций TSI (Skakun and Volobuev, 2017). Для вычисления были использованы данные реконструкции TSI и расчеты орбитальных параметров во время Голоцена. Было получено, что вариации TSI вносят больший вклад, по сравнению с вкладом орбитальной составляющей, в случае среднегодовой инсоляции по всему земному шару. Этот результат является верным по порядку величины, что было подтверждено в работе (Федоров, 2020). При рассмотрении интегральной инсоляции в широтных поясах было получено, что вклад вариаций TSI в приполярных регионах пренебрежимо мал и становится заметен только в районе экватора.
- Было обнаружено, что метод условных дисперсий можно применять к климатическим временным рядам для определения причинных связей между ними, при этом наличие неизбежного шума в эмпирических рядах вносит неопределенность в работу метода, но она достаточно мала, и ее можно оценить с помощью метода Монте-Карло (Skakun and Volobuev, 2018).
- Работа метода условных дисперсий была успешно откалибрована на концептуальной модели океан-атмосфера (Jin, 1997). Было получено, что наличие шума в данных уменьшает детектируемость причинной связи между временными рядами.

- С помощью метода условных дисперсий было обнаружено, что TSI влияет на NINO 3.4 и PDO (Skakun and Volobuev, 2021). Детектировать связь между NAO и TSI, NINO 3.4 и NAO этим методом не удалось, т.к. оценки условной дисперсии для зашумленных рядов не позволяют определить наличие причинной связи. Индексы NINO 3.4 и PDO синхронизированы, т.к. оба относятся к Тихому океану, поэтому для них нельзя определить направление причинной связи.
- Было получено (Skakun, Volobuev, Mordvinov, 2018), что прогнозированию методом аналогов Лоренца лучше поддаются однородные реконструкции (по единственному источнику данных).
- Был выполнен прогноз декадной средней TSI в 25-м солнечном цикле с помощью метода аналогов Лоренса (Mordvinov, Skakun, Volobuev, 2018) на основе реконструкции TSI, выполненной по одному прокси (Egorova et al., 2018). Точность прогноза была оценена по эпигнозу и сравнивалась с инерционным прогнозом.
- Было получено, что в следующем 25-м цикле солнечной активности следует ожидать умеренный спад амплитуды (на 0.4 Вт м⁻²) и значение десятилетнего среднего TSI будет соответствовать средневековому максимуму по величине (1360.3 Вт м⁻²). Полученный сценарий не предполагает наличие гранд-минимума в следующем десятилетии.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

Berg91 - параметры орбиты, посчитанные в статье (Berger and Loutre, 1991)

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (Межправительственная группа

экспертов по изменению климата)

- ISI Integrated Summer Insolation
- La2004 параметры орбиты, посчитанные в статье (Laskar et al., 2004)
- MCD Method of Conditional dispersions (Метод условных дисперсий)
- NAO North Atlantic Oscillation (Северо-Атлантическое колебание)
- NINO 3.4 Индекс Эль-Ниньо
- PDO Pacific Decadal Oscillation (Тихоокеанское десятилетнее колебание)
- SST Sea Surface Temperature (Температура поверхности моря)
- TSI Total Solar Irradiance (Солнечная постоянная)
- СА Солнечная Активность

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Афраймович В.С. Размерность и энтропия в многомерных системах / В.С. Афраймович, А.М. Рейнман // Нелинейные волны. Динамика и эволюция. – Москва, 1989. – С. 238-262.
- Безручко Б.П. Математическое моделирование и хаотические временные ряды.
 Т. 14 / Б.П. Безручко, Д.А. Смирнов. Саратов: ГосУНЦ «Колледж», 2005. 320 с.
- Воскресенская Е.Н. Классификация событий Эль-Ниньо и погодно-климатические аномалии в Черноморском регионе / Е.Н. Воскресенская, Н.В. Михайлова // Доповіді Національної академії наук України. – 2010. – № 3. – С. 120-124.
- Как обнаружить синхронизацию двух динамических систем по наблюдаемым временным рядам с пропусками / В.А. Дергачев [и др.] // Известия РАН. Серия физическая. – 2001. – Т. 65. – № 3. – С. 391-393.
- Шустер Г.Г. Детерминированный хаос: Введение. / Г.Г. Шустер. Москва: Мир, 1988. – 240 с.
- Abarbanel H.D.I. Generalized synchronization of chaos: The auxiliary system approach / H.D.I. Abarbanel, N.F. Rulkov, M.M. Sushchik // Physical Review E. – 1996. – T. 53. – Generalized synchronization of chaos. – № 5. – C. 4528-4535.
- ASDC | Projects | ACRIM II [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://asdc.larc.nasa.gov/project/ACRIMII.
- ASDC | Projects | ACRIM III [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://asdc.larc.nasa.gov/project/ACRIM%20III.
- 9. ASDC | Projects | NIMBUS-7 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://asdc.larc.nasa.gov/project/NIMBUS-7.
- Bugaev A. Climate variability and pacific salmon productivity in Russian Far East / A. Bugaev, O. Tepnin, V. Radchenko // The researches of the aquatic biological resources of Kamchatka and of the north-west part of the Pacific Ocean. – 2018. –

T. 49. – C. 5-50.

- 11. Eddy J.A. The Maunder minimum / J.A. Eddy // Science. 1976. T. 192. –
 № 4245. C. 1189-1202.
- Farmer J.D. Predicting chaotic time series / J.D. Farmer, J.J. Sidorowich // Physical Review Letters. – 1987. – T. 59. – № 8. – C. 845-848.
- 13. Geometry from a time series / N.H. Packard [et al.] // Physical Review Letters. –
 1980. T. 45. № 9. C. 712-716.
- Grassberger P. Characterization of strange attractors / P. Grassberger, I. Procaccia // Physical Review Letters. – 1983. – T. 50. – № 5. – C. 346-349.
- Hurrell J.W. Decadal variations in climate associated with the north atlantic oscillation / J.W. Hurrell, H. Van Loon // Climatic Change. 1997. T. 36. C. 301-326.
- 16. Jin F.-F. An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part I: conceptual model. / F.-F. Jin // Journal of Atmospheric Sciences. – 1997. – T. 54. – An Equatorial Ocean Recharge Paradigm for ENSO. Part I. – C. 811-829.
- 17. Laskar J. The limits of Earth orbital calculations for geological time-scale use |
 Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical,
 Physical and Engineering Sciences / J. Laskar // Philosophical Transactions:
 Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1999. T. 357. № 1757. –
 C. 1735-1759.
- 18. McCracken J.M. Exploratory causal analysis with time series data / J.M. McCracken
 // Synthesis Lectures on Data Mining and Knowledge Discovery. 2016. T. 8. –
 № 1. C. 1-147.
- Milankovitch M.K. Kanon der erdbestrahlung und seine anwendung auf das eiszeitenproblem / M.K. Milankovitch // Royal Serbian Academy Special Publication. – 1941. – T. 133. – C. 1-633.
- Polonskii A. North atlantic oscillation and upper layer heat balance in the north atlantic / A. Polonskii, P.A. Sukhonos // Fundamental and Applied Climatology. 2019. T. 4. C. 67-100.

- 21. Prediction of solar cycle 25: a non-linear approach / V. Sarp [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2018. Т. 481. № 3. C. 2981-2985.
- 22. Quiroga R.Q. Learning driver-response relationships from synchronization patterns / R.Q. Quiroga, J. Arnhold, P. Grassberger // Physical Review E. 2000. T. 61. № 5. C. 5142-5148.
- 23. Rind D. The Sun's role in climate variations / D. Rind // Science. 2002. T. 296. № 5568. C. 673-677.
- 24. Schröder W. On the existence of the 11-year cycle in solar and auroral activity before and during the so-called Maunder Minimum / W. Schröder // Journal of geomagnetism and geoelectricity. – 1992. – T. 44. – № 2. – C. 119-128.
- 25. Sello S. Solar cycle activity: an early prediction for cycle #25 / S. Sello // arXiv:1902.05294 [astro-ph]. 2019. Solar cycle activity.
- 26. SMM Home Page [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://umbra.nascom.nasa.gov/smm/.
- 27. SORCE[Электронный ресурс].–Режимдоступа:https://lasp.colorado.edu/home/sorce/.
- 28. Svensmark H. Influence of cosmic rays on Earth's climate / H. Svensmark // Physical Review Letters. 1998. T. 81. № 22. C. 5027-5030.
- 29. The «Official» VIRGO Home Page [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.ias.u-psud.fr/virgo/virgo_ancien/.
- 30. The TSI Radiometer Facility: absolute calibrations for total solar irradiance instruments / Kopp [и др.] // Earth Observing Systems XII Earth Observing Systems XII. International Society for Optics and Photonics, 2007. T. 6677. The TSI Radiometer Facility. C. 667709.
- 31. Total solar irradiance measurements with PREMOS/PICARD / W. Schmutz [и др.]
 // Radiation processes in the atmosphere and ocean (IRS2012): Proceedings of the International Radiation Symposium (IRC/IAMAS). Dahlem Cube, Free University, Berlin, 2013. C. 624-627.

- 32. TSIS 1 » Data [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://lasp.colorado.edu/home/tsis/data/.
- Большаков В.А. Новая концепция орбитальной теории палеоклимата / В.А.
 Большаков. Издательство Московского университета. Москва, 2003. 256 с.
- 34. Нестеров Е.С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. Североатлантическое колебание / Е.С. Нестеров. – ООО «Триада», 2013. – 127 с.
- 35. Обридко В.Н. Солнечная активность, цикличность и методы прогноза / В.Н. Обридко, Ю.А. Наговицын. ООО «Издательство ВВМ», 2017. 466 с.
- 36. Скакун А.А. Исследование погрешностей орбитального метода датирования льда по данным о его газосодержании на примере ледяного керна со станции Купол Фуджи (Антарктида) / А.А. Скакун, В.Я. Липенков // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2016. – Т. 0. – № 4. – С. 14-29.
- 37. Смульский И.И. Анализ уроков развития астрономической теории палеоклимата / И.И. Смульский // Вестник Российской Академии Наук. 2013.
 Т. 83. № 1.
- 38. Федоров В.М. Влияние формы Земли на характеристики облучения земной поверхности / В.М. Федоров, А.А. Костин, Д.М. Фролов // Геофизические процессы и биосфера. – 2020. – Т. 19. – № 3.
- 39. Федоров В.М. Широтная изменчивость приходящей солнечной радиации в различных временных циклах / В.М. Федоров // Доклады Академии Наук. 2015. Т. 460. № 3.
- 40. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth / J. Laskar [et al.] // Astronomy & Astrophysics. 2004. Vol. 428. № 1. P. 261-285.
- 41. A solar irradiance climate data record / O. Coddington [et al.] // Bulletin of the American Meteorological Society. 2016. Vol. 97. № 7. P. 1265-1282.
- 42. Abdussamatov H. Energy imbalance between the Earth and space controls the climate / H. Abdussamatov // Earth Sciences. 2020. Vol. 9. № 4. P. 117.
- 43. An assessment of sunspot number data composites over 1845–2014 / M. Lockwood

[et al.] // The Astrophysical Journal. – 2016. – Vol. 824. – № 1. – P. 54.

- 44. Berger A. Long-term variations of daily insolation and quaternary climatic changes /
 A. Berger // Journal of Atmospheric Sciences. 1978. T. 35. № 12. C. 2362-2367.
- 45. Berger A. Astronomical solutions for paleoclimate studies over the last 3 million years / A. Berger, M.F. Loutre // Earth and Planetary Science Letters. 1992. Vol. 111. № 2. P. 369-382.
- 46. Berger A. Insolation values for the climate of the last 10 million years / A. Berger,
 M.F. Loutre // Quaternary Science Reviews. 1991. Vol. 10. № 4. P. 297-317.
- 47. Berger A. Total irradiation during any time interval of the year using elliptic integrals / A. Berger, M.-F. Loutre, Q. Yin // Quaternary Science Reviews. 2010. Vol. 29. № 17. P. 1968-1982.
- 48. Čenys A. Estimation of interrelation between chaotic observables / A. Čenys, G. Lasiene, K. Pyragas // Physica D: Nonlinear Phenomena. 1991. Vol. 52. № 2. P. 332-337.
- 49. Delaygue G. An Antarctic view of Beryllium-10 and solar activity for the past millennium / G. Delaygue, E. Bard // Climate Dynamics. 2011. Vol. 36. № 11. P. 2201-2218.
- 50. Dergachev V.A. Climate oscillations in the arctic region in the holocene and solar activity / V.A. Dergachev, S.N. Losev // Geomagnetism and Aeronomy. 2021. Vol. 61. № 8. P. 1141-1149.
- 51. Detecting causality signal in instrumental measurements and climate model simulations: global warming case study / M.Y. Verbitsky [и др.] // Geoscientific Model Development. 2019. Т. 12. Detecting causality signal in instrumental measurements and climate model simulations. № 9. С. 4053-4060.
- 52. ERBE NASA Langley Research Center Science Directorate [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://science.larc.nasa.gov/erbe/.
- 53. Evolution of the solar irradiance during the Holocene / L.E.A. Vieira [et al.] // Astronomy & Astrophysics. 2011. Vol. 531. P. A6.

- 54. First realisation of the Space Absolute Radiometric Reference (SARR) during the ATLAS 2 flight period : EURECA Scientific Results / D. Crommelynck [et al.] // Advances in Space Research. 1995. Vol. 16. № 8. P. 17-23.
- 55. Fröhlich C. The Sun's total irradiance: Cycles, trends and related climate change uncertainties since 1976 / C. Fröhlich, J. Lean // Geophysical Research Letters. 1998. Vol. 25. The Sun's total irradiance. № 23. P. 4377-4380.
- 56. Georgieva K. Reconstruction of the long term variations of the total solar irradiance from geomagnetic data / K. Georgieva, Yu. Nagovitsyn, B. Kirov // Geomagnetism and Aeronomy. – 2015. – Vol. 55. – № 8. – P. 1026-1032.
- 57. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century / N.A. Rayner [et al.] // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2003. Vol. 108. № D14.
- 58. Haigh J.D. Climate variability and the influence of the Sun / J.D. Haigh // Science. –
 2001. Vol. 294. № 5549. P. 2109-2111.
- 59. Huybers P. Early pleistocene glacial cycles and the integrated summer insolation forcing / P. Huybers // Science. 2006. Vol. 313. № 5786. P. 508-511.
- 60. Kitiashvili I.N. Application of synoptic magnetograms to global solar activity forecast / I.N. Kitiashvili // The Astrophysical Journal. 2020. Vol. 890. № 1. P. 36.
- 61. Kopp. 5.02 Earth's incoming energy: the total solar irradiance / Kopp // Comprehensive Remote Sensing / ed. S. Liang. Oxford: Elsevier, 2018. 5.02 Earth's Incoming Energy. P. 32-66.
- 62. Kopp. A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance / Kopp, J.L. Lean // Geophysical Research Letters. 2011. Vol. 38. A new, lower value of total solar irradiance. № 1.
- 63. La2010: a new orbital solution for the long-term motion of the Earth / J. Laskar [et al.] // Astronomy & Astrophysics. 2011. Vol. 532. La2010. P. A89.
- 64. Laskar J. A numerical experiment on the chaotic behaviour of the Solar System / J. Laskar // Nature. 1989. Vol. 338. № 6212. P. 237-238.

- 65. Launay F. Pouillet, Claude-Servais-Mathias-Marie-Roland / F. Launay // The Biographical Encyclopedia of Astronomers / eds. T. Hockey [et al.]. – New York, NY: Springer, 2007. – P. 928-929.
- 66. Laut P. Solar activity and terrestrial climate: an analysis of some purported correlations / P. Laut // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2003. Vol. 65. Solar activity and terrestrial climate. № 7. P. 801-812.
- 67. Li K.J. On long-term predictions of the maximum sunspot numbers of solar cycles
 21 to 23 / K.J. Li, H.S. Yun, X.M. Gu // Astronomy & Astrophysics. 2001. –
 Vol. 368. № 1. P. 285-291.
- 68. Lisiecki L.E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic δ180 records / L.E. Lisiecki, M.E. Raymo // Paleoceanography. 2005. Vol. 20. № 1.
- 69. Lorenz E.N. Atmospheric predictability as revealed by naturally occurring analogues
 / E.N. Lorenz // Journal of the Atmospheric Sciences. 1969. T. 26. № 4. C. 636-646.
- 70. Mantua N.J. The pacific decadal oscillation / N.J. Mantua, S.R. Hare // Journal of Oceanography. – 2002. – Vol. 58. – № 1. – P. 35-44.
- 71. Measurement and uncertainty of the long-term total solar irradiance trend / S. Dewitte [et al.] // Solar Physics. 2004. Vol. 224. № 1. P. 209-216.
- 72. Mekaoui S. Total solar irradiance measurement and modelling during cycle 23 / S. Mekaoui, S. Dewitte // Solar Physics. 2008. Vol. 247. № 1. P. 203-216.
- 73. Methodology to create a new total solar irradiance record: Making a composite out of multiple data records / T.D. de Wit [et al.] // Geophysical Research Letters. 2017. Vol. 44. Methodology to create a new total solar irradiance record. № 3. P. 1196-1203.
- 74. Nandy D. Progress in solar cycle predictions: sunspot cycles 24–25 in perspective / D. Nandy // Solar Physics. 2021. Vol. 296. Progress in Solar Cycle Predictions. № 3. P. 54.
- 75. On the potential of coupling air content and O2/N2 from trapped air for establishing an ice core chronology tuned on local insolation / V.Ya. Lipenkov [et al.] //

Quaternary Science Reviews. – 2011. – Vol. 30. – № 23. – P. 3280-3289.

- 76. Persistent solar influence on north atlantic climate during the Holocene / G. Bond [et al.] // Science. 2001. Vol. 294. № 5549. P. 2130-2136.
- 77. Pesnell W.D. Predictions of solar cycle 24: How are we doing? / W.D. Pesnell // Space Weather. 2016. Vol. 14. Predictions of Solar Cycle 24. № 1. P. 10-21.
- 78. Pesnell W.D. Solar cycle predictions (invited review) / W.D. Pesnell // Solar Physics.
 2012. Vol. 281. № 1. P. 507-532.
- 79. Petrovay K. Solar cycle prediction / K. Petrovay // Living Reviews in Solar Physics.
 2020. Vol. 17. № 1. P. 2.
- 80. Preminger D.G. Modeling solar spectral irradiance and total magnetic flux using sunspot areas / D.G. Preminger, S.R. Walton // Solar Physics. 2006. Vol. 235. № 1. P. 387-405.
- Privalsky V. Application to sunspot numbers and total solar irradiance / V. Privalsky
 // Time Series Analysis in Climatology and Related Sciences : Progress in Geophysics / ed. V. Privalsky. – Cham: Springer International Publishing, 2021. – P. 205-220.
- 82. Raymo M.E. The 41 kyr world: Milankovitch's other unsolved mystery / M.E. Raymo, K.H. Nisancioglu // Paleoceanography. 2003. Vol. 18. The 41 kyr world. № 1.
- Reconstruction of total and spectral solar irradiance from 1974 to 2013 based on KPVT, SoHO/MDI, and SDO/HMI observations / K.L. Yeo [et al.] // Astronomy & Astrophysics. – 2014. – Vol. 570. – P. A85.
- 84. Reid G.C. Solar variability and the Earth's climate: introduction and overview / G.C. Reid // Space Science Reviews. 2000. Vol. 94. Solar Variability and the Earth's Climate. № 1. P. 1-11.
- 85. Revised historical solar irradiance forcing / T. Egorova [et al.] // Astronomy & Astrophysics. 2018. Vol. 615. P. A85.
- 86. Revisiting the sunspot number / F. Clette [et al.] // Space Science Reviews. 2014. -

Vol. 186. – № 1. – P. 35-103.

- 87. Roth R. A reconstruction of radiocarbon production and total solar irradiance from the Holocene ¹⁴C and CO₂ records: implications of data and model uncertainties / R. Roth, F. Joos // Climate of the Past. 2013. T. 9. A reconstruction of radiocarbon production and total solar irradiance from the Holocene ¹⁴C and CO₂ records. № 4. C. 1879-1909.
- Schneider P. Studying attractor symmetries by means of cross-correlation sums / P. Schneider, P. Grassberger // Nonlinearity. 1997. Vol. 10. № 3. P. 749-762.
- 89. Skakun A.A. Contribution of the solar constant variations to calculations of insolation for the holocene period / A.A. Skakun, D.M. Volobuev // Geomagnetism and Aeronomy. – 2017. – Vol. 57. – № 7. – P. 902-905.
- 90. Solar influences on climate / L.J. Gray [et al.] // Reviews of Geophysics. 2010. –
 Vol. 48. № 4.
- 91. Solar total and spectral irradiance reconstruction over the last 9000 years / C.-J. Wu [et al.] // Astronomy & Astrophysics. 2018. Vol. 620. P. A120.
- 92. Soon W. Solar irradiance modulation of Equator-to-Pole (Arctic) temperature gradients: Empirical evidence for climate variation on multi-decadal timescales / W. Soon, D.R. Legates // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2013. Vol. 93. Solar irradiance modulation of Equator-to-Pole (Arctic) temperature gradients. P. 45-56.
- 93. Steinhilber F. Total solar irradiance during the Holocene / F. Steinhilber, J. Beer, C. Fröhlich // Geophysical Research Letters. 2009. Vol. 36. № 19.
- 94. Stevens M.J. Detection of the climate response to the solar cycle / M.J. Stevens, G.R. North // Journal of the Atmospheric Sciences. 1996. T. 53. № 18. C. 2594-2608.
- 95. Sugihara G. Nonlinear forecasting as a way of distinguishing chaos from measurement error in time series / G. Sugihara, R.M. May // Nature. – 1990. – Vol. 344. – № 6268. – P. 734-741.
- 96. Takens F. Detecting strange attractors in turbulence / F. Takens // Dynamical

Systems and Turbulence, Warwick 1980 : Lecture Notes in Mathematics / eds. D. Rand, L.-S. Young. – Berlin, Heidelberg: Springer, 1981. – P. 366-381.

- 97. Tans P.P. Natural atmospheric ¹⁴C variation and the Suess effect / P.P. Tans, A.F.M. De Jong, W.G. Mook // Nature. 1979. Vol. 280. № 5725. P. 826-828.
- 98. The distribution of bomb radiocarbon in the ocean / W.S. Broecker [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1985. Vol. 90. № C4. P. 6953-6970.
- 99. The dynamic measurement and utilization of solar heat [Электронный ресурс]. Режим доступа:

https://www.scientificamerican.com/article/the-dynamic-measurement-and-utiliza/.

- 100. The footprint of the 11-year solar cycle in northeastern pacific SSTs and its influence on the central pacific el niño / Y.-F. Lin [et al.] // Geophysical Research Letters. – 2021. – Vol. 48. – № 5. – P. e2020GL091369.
- 101. The global energy balance from a surface perspective / M. Wild [et al.] // Climate Dynamics. 2013. Vol. 40. № 11. P. 3107-3134.
- 102. The local insolation signature of air content in Antarctic ice. A new step toward an absolute dating of ice records / D. Raynaud [et al.] // Earth and Planetary Science Letters. – 2007. – Vol. 261. – № 3. – P. 337-349.
- 103. The revised sunspot record in comparison to cosmogenic radionuclide-based solar activity reconstructions / R. Muscheler [et al.] // Solar Physics. 2016. Vol. 291. № 9. P. 3025-3043.
- 104. Tlatov A.G. On the timing of the next great solar activity minimum / A.G. Tlatov,
 A.A. Pevtsov // Advances in Space Research. 2017. Vol. 60. № 5. –
 P. 1108-1114.
- 105. Total solar irradiance as measured by the SOVAP radiometer onboard PICARD / M. Meftah [et al.] // Journal of Space Weather and Space Climate. 2016. Vol. 6. P. A34.
- 106. Total solar irradiance data record accuracy and consistency improvements / Kopp [et al.] // Metrologia. – 2012. – Vol. 49. – № 2. – P. S29-S33.
- 107. Usoskin I.G. Long-term solar cycle evolution: review of recent developments /

I.G. Usoskin, K. Mursula // Solar Physics. – 2003. – Vol. 218. – Long-Term Solar Cycle Evolution. – № 1. – P. 319-343.

- 108. Velasco Herrera V.M. Reconstruction and prediction of the total solar irradiance: From the Medieval warm period to the 21st century / V.M. Velasco Herrera, B. Mendoza, G. Velasco Herrera // New Astronomy. – 2015. – Vol. 34. – Reconstruction and prediction of the total solar irradiance. – P. 221-233.
- 109. Volobuev D.M. Central antarctic climate response to the solar cycle / D.M.
 Volobuev // Climate Dynamics. 2014. Vol. 42. № 9. P. 2469-2475.
- 110. Volobuev D.M. Forecast of the Decadal Average Sunspot Number / D.M. Volobuev, N.G. Makarenko // Solar Physics. 2008. Vol. 249. № 1. P. 121-133.
- 111. Volobuev D.M. The shape of the sunspot cycle: a one-parameter fit / D.M.
 Volobuev // Solar Physics. 2009. Vol. 258. The Shape of The Sunspot Cycle. N
 ^o 2. P. 319-330.
- Wen C. Factors contributing to uncertainty in Pacific Decadal Oscillation index / C. Wen, A. Kumar, Y. Xue // Geophysical Research Letters. 2014. Vol. 41. N
 ^o 22. P. 7980-7986.
- White W.B. Non-linear alignment of El Niño to the 11-yr solar cycle / W.B.
 White, Z. Liu // Geophysical Research Letters. 2008. Vol. 35. № 19.
- Willson R.C. Secular total solar irradiance trend during solar cycles 21–23 / R.C.
 Willson, A.V. Mordvinov // Geophysical Research Letters. 2003. Vol. 30. № 5.
- 115. Willson R.C. Total solar irradiance trend during solar cycles 21 and 22 / R.C.
 Willson // Science. 1997. Vol. 277. № 5334. P. 1963-1965.
- 116. Zacharias P. An independent review of existing total solar irradiance records / P.
 Zacharias // Surveys in Geophysics. 2014. Vol. 35. № 4. P. 897-912.
- 117. Zolotova N.V. The maunder minimum is not as grand as it seemed to be / N.V. Zolotova, D.I. Ponyavin // The Astrophysical Journal. 2015. Vol. 800. № 1. P. 42.