

*На правах рукописи*



**Скакун Александра Андреевна**

**ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ИНСОЛЯЦИИ НА ЗЕМНОЙ КЛИМАТ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОДХОДА НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ**

специальность: 01.03.03 – физика Солнца

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Главная (Пулковская) Астрономическая Обсерватория Российской академии наук» (ГАО РАН)

**Научный руководитель:**

ВОЛОБУЕВ Дмитрий Михайлович,  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник сектора математического моделирования нелинейных процессов в гелио/геофизике Главной (Пулковской) Астрономической Обсерватории Российской академии наук (ГАО РАН).

**Официальные оппоненты:**

ЗОЛотова Надежда Валерьевна,  
доктор физико-математических наук,  
доцент лаборатории физики магнитосферы кафедры физики Земли физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (СПбГУ)

СЕРЫХ Илья Викторович,  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник лаборатории крупномасштабной изменчивости гидрофизических полей отдела крупномасштабных процессов и климата Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской Академии Наук (ИО РАН)

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ)

Защита состоится 16 сентября 2022 г. в 12 час. 45 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.120.01 на базе Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук по адресу: 196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д. 65, корп. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАО РАН и на сайте ГАО РАН [http://www.gaoran.ru/wp-content/uploads/2022/07/Dissertatsia\\_SkakunAA.pdf](http://www.gaoran.ru/wp-content/uploads/2022/07/Dissertatsia_SkakunAA.pdf).

Автореферат разослан 16 августа 2022 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.120.01  
кандидат физико-математических наук



А.А. Осипова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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.). С другой стороны, в число факторов, влияющих на земной климат, также входит и форсинг (внешняя воздействующая сила), 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  $1365 \text{ Вт м}^{-2}$ , 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 (Dergachev and Losev, 2021; Gray et al., 2010; 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).

Коэффициент корреляции Пирсона сам по себе не 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.

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

**Целью настоящей работы** является теоретический анализ влияния двух составляющих инсоляции – (1) орбитальной и (2) обусловленной солнечной активностью (СА) - 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 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 СА 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 Гауссова 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 для теоретического исследования влияния инсоляции на изменения климата 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 СА 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 СА, 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**

Полученные результаты призваны, в первую очередь, предоставить ограничения, обусловленные наблюдательными данными, для улучшения существующих прогностических климатических моделей. Такие модели позволяют произвести прогноз глобальных изменений климата, предполагая разные варианты развития событий. 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 (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 (1.2 млн лет назад) являлись вариации инсоляции, обусловленные орбитальной составляющей.

На данный момент общество уже столкнулось с глобальными изменениями климата и острой необходимостью действовать, исходя из реалистичных прогнозов будущих возможных изменений климата. Построение таких 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 исследователей окажется еще один инструмент улучшения качества моделей. Как

следствие, исследователи смогут получать более точные прогнозы будущих изменений климата и разработать адекватный ответ на них.

В этой работе также 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 диссертации были доложены на 6 конференциях 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. 11-я 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 в изданиях, 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. – Т. 57. – №. 7. – С. 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. – Т. 58. – №. 8. – С. 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. – Т. 58. – №. 8. – С. 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 объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы, включающего 117 наименований. Работа изложена на 96 страницах формата А4 и включает 19 рисунков и 5 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, описаны объект и предмет исследования, сформулированы задачи и цели работы, ее научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиту, и краткая информация о содержании работы.

**Первая глава «Инсоляция и ее составляющие»** посвящена корректному определению термина инсоляция, способам ее расчета и вкладам ее орбитально обусловленной и обусловленной СА 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, приведенные разными авторами (Berger, Loutre, 1991, Laskar et al., 2004), обсуждается, как неопределенности в их расчете могут отразиться на расчете инсоляции. Так, например, для Голоцена они никак не отражаются. Отдельно обсуждается TSI как обусловленная СА составляющая инсоляции, кратко приводятся факты из истории эмпирических наблюдений TSI. 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 данным, по которым можно реконструировать значения TSI (визуальные наблюдения Солнечных пятен, относительное содержание углерода-14 в кольцах деревьев и бериллия-10 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 широтах, близких к экватору, в то время как в полярных областях он пренебрежимо мал по сравнению с трендовыми вариациями, вызванными изменениями орбитальных параметров (Рис. 1). 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 колебания солнечной постоянной играют основную роль в величине амплитуды на фоне тренда на снижение, обусловленного орбитальными вариациями (см. Рис. 2). Тренды изменения инсоляции на протяжении Голоцена приводят к усилению межширотного градиента от раннего Голоцена к настоящему времени, что согласуется с результатами (Федоров, 2015).

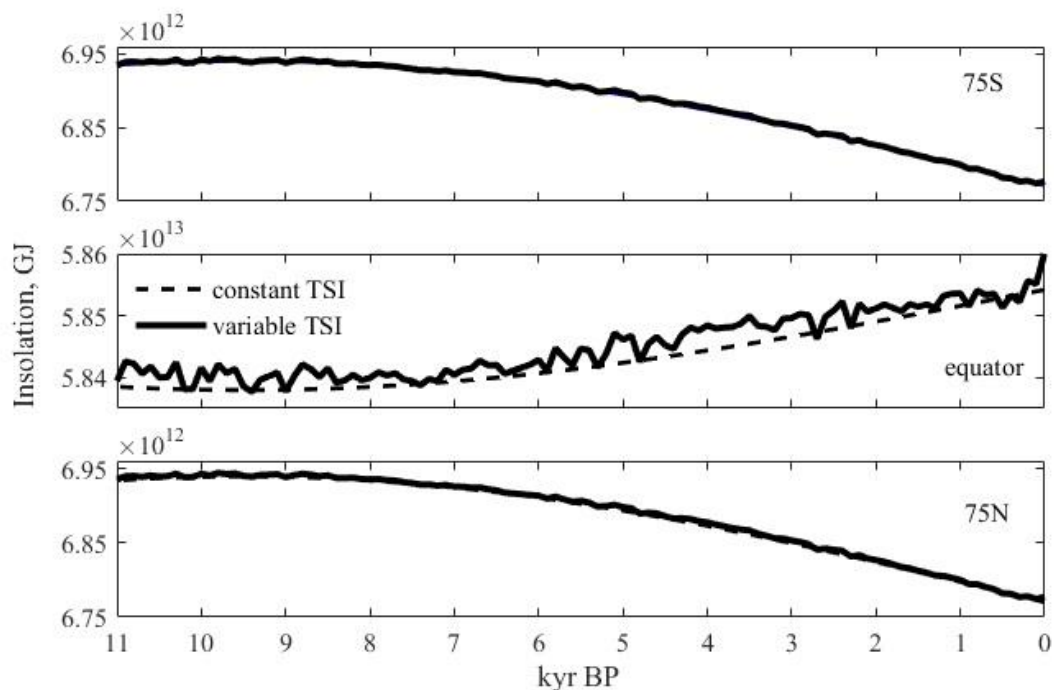


Рис.1. Суммарная годовая инсоляция в широтных поясах ( $75^{\circ}$  ю. ш., экватор,  $75^{\circ}$  с. ш.). Толстыми линиями показаны вариации инсоляции с учетом изменений солнечной постоянной, тонкими – без их учета.

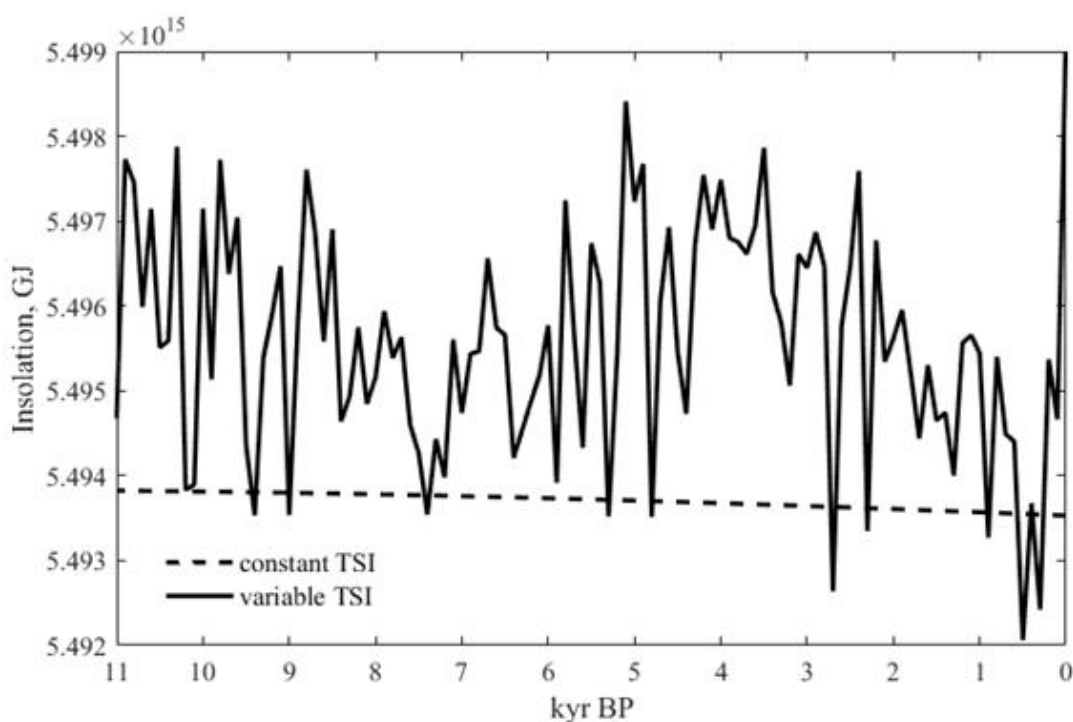


Рис. 2. Интегральная инсоляция по всей сфере. Толстой линией показаны изменения инсоляции с учетом вариаций солнечной постоянной, тонкой – без их учета.

Во **второй главе «Метод условных дисперсий и его апробация»** приводится подробное описание нелинейного метода определения направления причинной связи между временными рядами и приводится пример его использования. Этот метод впервые был введен в работе (Šenys 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. Уточняется, как необходимо интерпретировать результаты работы метода на примере двух связанных отображений Энона. Отдельно обсуждается методика оценки ошибок работы метода условных дисперсий с помощью искусственного добавления шума во временные ряды – 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 проводится оценка погрешности 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  $1361 \text{ Вт м}^{-2}$ ) 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 трех эмпирических 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 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 (см. Рис. 3).

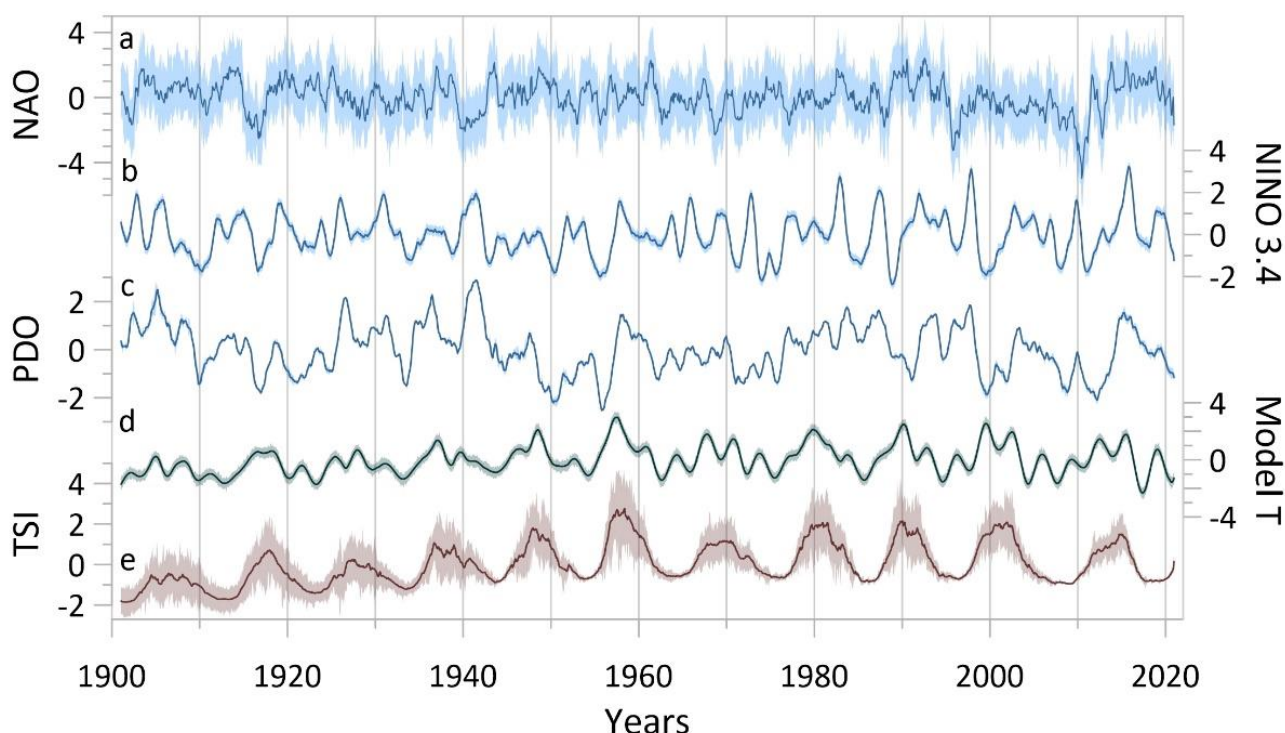


Рис. 3. Нормированные фильтрованные рассмотренные временные ряды с планками погрешностей, определенными с помощью шумовых реализаций. Сглаженные и нормированные временные ряды (a) NAO, (b) NINO 3.4, (c) PDO, (d) Model T, (e) TSI. В виде теней показаны области, покрытые шумовыми реализациями временных рядов.

Получены следующие результаты: 1) TSI влияет на NINO 3.4 и PDO; 2) для пар NAO – TSI, NAO – NINO 3.4 определить направление связи не удалось вследствие большого уровня шумов 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 выявить преимущественные 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»** используется метод аналогов Лоренца в качестве способа прогнозирования реконструкций солнечной активности, а также выполняется прогноз декадного среднего TSI на промежутке времени 2023 г.  $\pm$  5 лет. Подавляющее большинство “традиционных” прогнозов СА делается для числа солнечных пятен (Petrovay, 2020), но их результаты сильно разнятся между собой. Прогноз

TSI является сравнительно новой и ещё более сложной задачей. 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. Этот 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 конец временного ряда шаблонов и т.о., анализируя продолжения этих шаблонов, 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 их производной по 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  $^{10}\text{Be}$  в антарктических ледяных кернах со станции Купол Фуджи и Южного полюса (Delaygue et al., 2011); данные о солнечном потенциале, полученным 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 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.  $\pm 5$  лет, полученное значение  $1360.3 \text{ Вт м}^{-2}$  соответствует средневековому максимуму по величине и не предполагает наличие гранд-минимума в следующем десятилетии (см. Рис. 4).

Ошибка прогноза велика (ее максимальная величина составляет  $1.2 \text{ Вт м}^{-2}$ ), 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.

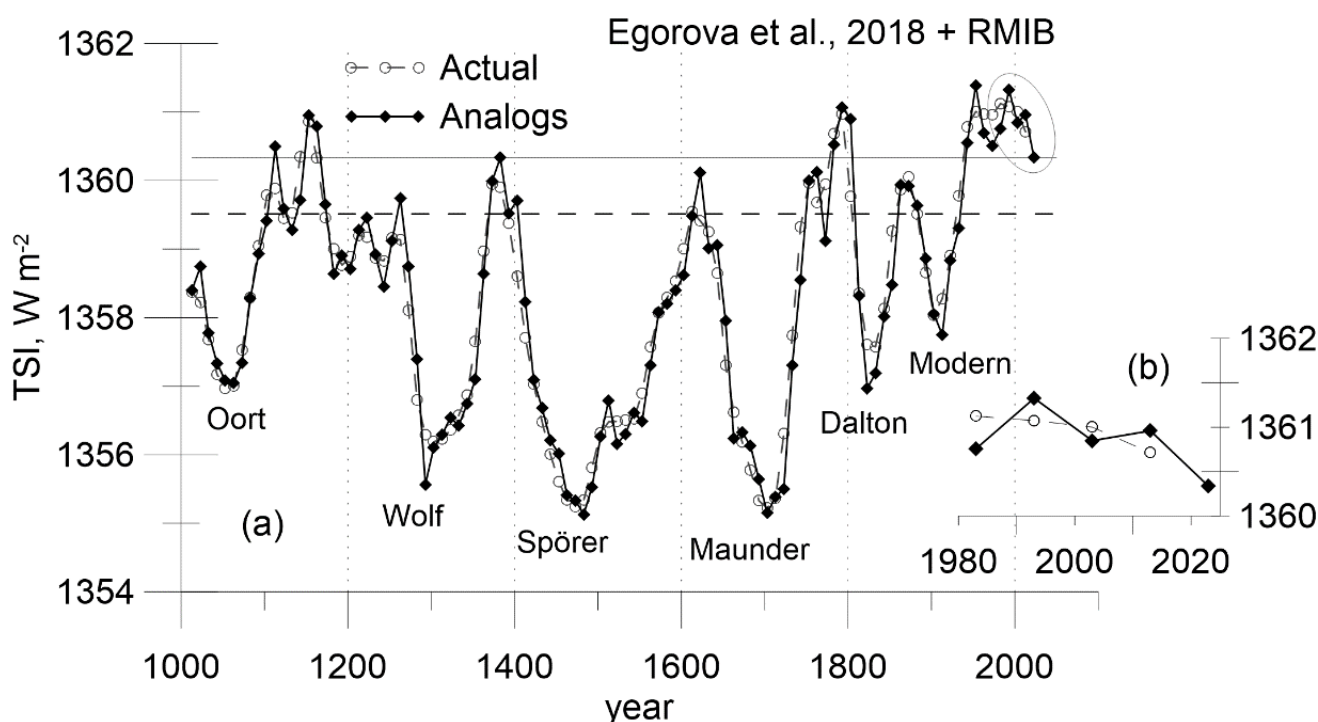


Рис. 4. Результаты прогноза реконструкции TSI (Egorova et al., 2018). На подграфике (а) показана тестовая выборка: настоящие значения TSI (Actual) и предсказанные методом аналогов (Analogues). Прерывистой горизонтальной линией обозначена линия уровня в случае максимальной ошибки прогноза ( $1.2 \text{ Вт м}^{-2}$ ), сплошной горизонтальной линией показана линия уровня спрогнозированного значения. Также на подграфике (а) подписаны названия известных минимумов солнечного цикла. На подграфике (б) показан прогноз TSI на декаду 2023 г.  $\pm 5$  лет.

**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 и др., 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 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.
- 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  $0.4 \text{ Вт м}^{-2}$ ) и значение десятилетнего среднего TSI будет соответствовать средневековому максимуму по величине ( $1360.3 \text{ Вт м}^{-2}$ ). Основной вывод: полученный сценарий не предполагает наличие гранд-минимума в следующем десятилетии.

#### **Список используемых источников:**

- 1) Abarbanel, H. D. I., Rulkov, N. F., and Sushchik, M. M. (1996). Generalized synchronization of chaos: The auxiliary system approach. *Phys. Rev. E* 53, 4528–4535. doi: 10.1103/PhysRevE.53.4528.
- 2) Berger, A. (1978). Long-term variations of daily insolation and quaternary climatic changes. *J. Atmospheric Sci.* 35, 2362–2367. doi: 10.1175/1520-0469(1978)035<2362:LTVODI>2.0.CO;2.

- 3) Berger, A., and Loutre, M. F. (1991). Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quat. Sci. Rev.* 10, 297–317. doi: 10.1016/0277-3791(91)90033-Q.
- 4) Čenys, A., Lasienė, G., and Pyragas, K. (1991). Estimation of interrelation between chaotic observables. *Phys. Nonlinear Phenom.* 52, 332–337. doi: 10.1016/0167-2789(91)90130-2.
- 5) Delaygue, G., and Bard, E. (2011). An Antarctic view of Beryllium-10 and solar activity for the past millennium. *Clim. Dyn.* 36, 2201–2218. doi: 10.1007/s00382-010-0795-1.
- 6) Dergachev, V. A., and Losev, S. N. (2021). Climate oscillations in the arctic region in the holocene and solar activity. *Geomagn. Aeron.* 61, 1141–1149. doi: 10.1134/S0016793221080041.
- 7) Egorova, T., Schmutz, W., Rozanov, E., Shapiro, A. I., Usoskin, I., Beer, J., et al. (2018). Revised historical solar irradiance forcing. *Astron. Astrophys.* 615, A85. doi: 10.1051/0004-6361/201731199.
- 8) Farmer, J. D., and Sidorowich, J. J. (1987). Predicting chaotic time series. *Phys. Rev. Lett.* 59, 845–848. doi: 10.1103/PhysRevLett.59.845.
- 9) Gray, L. J., Beer, J., Geller, M., Haigh, J. D., Lockwood, M., Matthes, K., et al. (2010). Solar influences on climate. *Rev. Geophys.* 48. doi: 10.1029/2009RG000282.
- 10) Jin, F.-F. (1997). An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part i: conceptual model. *J. Atmospheric Sci.* 54, 811–829. doi: 10.1175/1520-0469(1997)054<0811:AEORPF>2.0.CO;2.
- 11) Laskar, J., Robutel, P., Joutel, F., Gastineau, M., Correia, A. C. M., and Levrard, B. (2004). A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth. *Astron. Astrophys.* 428, 261–285. doi: 10.1051/0004-6361:20041335.
- 12) Lin, Y.-F., Yu, J.-Y., Wu, C.-R., and Zheng, F. (2021). The footprint of the 11-year solar cycle in northeastern pacific ssts and its influence on the central pacific el niño. *Geophys. Res. Lett.* 48, e2020GL091369. doi: 10.1029/2020GL091369.
- 13) Lisiecki, L. E., and Raymo, M. E. (2005). A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}\text{O}$  records. *Paleoceanography* 20. doi: <https://doi.org/10.1029/2004PA001071>.
- 14) Lorenz, E. N. (1969). Atmospheric predictability as revealed by naturally occurring analogues. *J. Atmospheric Sci.* 26, 636–646. doi: 10.1175/1520-0469(1969)26<636:APARBN>2.0.CO;2.
- 15) Petrovay, K. (2020). Solar cycle prediction. *Living Rev. Sol. Phys.* 17, 2. doi: 10.1007/s41116-020-0022-z.
- 16) Reid, G. C. (2000). Solar variability and the Earth's climate: introduction and overview. *Space Sci. Rev.* 94, 1–11. doi: 10.1023/A:1026797127105.
- 17) Roth, R., and Joos, F. (2013). A reconstruction of radiocarbon production and total solar irradiance from the Holocene  $^{14}\text{C}$  and  $\text{CO}_2$  records: implications of data and model uncertainties. *Clim. Past* 9, 1879–1909. doi: 10.5194/cp-9-1879-2013.
- 18) Steinhilber, F., Beer, J., and Fröhlich, C. (2009). Total solar irradiance during the Holocene. *Geophys. Res. Lett.* 36. doi: 10.1029/2009GL040142.

- 19) Takens, F. (1981). Detecting strange attractors in turbulence. in *Dynamical Systems and Turbulence, Warwick 1980 Lecture Notes in Mathematics.*, eds. D. Rand and L.-S. Young (Berlin, Heidelberg: Springer), 366–381. doi: 10.1007/BFb0091924.
- 20) Verbitsky, M. Y., Mann, M. E., Steinman, B. A., and Volobuev, D. M. (2019). Detecting causality signal in instrumental measurements and climate model simulations: global warming case study. *Geosci. Model Dev.* 12, 4053–4060. doi: 10.5194/gmd-12-4053-2019.
- 21) Vieira, L. E. A., Solanki, S. K., Krivova, N. A., and Usoskin, I. (2011). Evolution of the solar irradiance during the Holocene. *Astron. Astrophys.* 531, A6. doi: 10.1051/0004-6361/201015843.
- 22) Volobuev, D. M. (2014). Central antarctic climate response to the solar cycle. *Clim. Dyn.* 42, 2469–2475. doi: 10.1007/s00382-013-1925-3.
- 23) Volobuev, D. M., and Makarenko, N. G. (2008). Forecast of the Decadal Average Sunspot Number. *Sol. Phys.* 249, 121–133. doi: 10.1007/s11207-008-9167-y.
- 24) White, W. B., and Liu, Z. (2008). Non-linear alignment of El Niño to the 11-yr solar cycle. *Geophys. Res. Lett.* 35. doi: 10.1029/2008GL034831.
- 25) Wit, T. D. de, Kopp, G., Fröhlich, C., and Schöll, M. (2017). Methodology to create a new total solar irradiance record: Making a composite out of multiple data records. *Geophys. Res. Lett.* 44, 1196–1203. doi: <https://doi.org/10.1002/2016GL071866>.
- 26) Zacharias, P. (2014). An independent review of existing total solar irradiance records. *Surv. Geophys.* 35, 897–912. doi: 10.1007/s10712-014-9294-y.
- 27) Обридко, В. Н. и Наговицын, Ю. А. (2017). Солнечная активность, цикличность и методы прогноза. ООО “Издательство ВВМ” Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=31796356> [Accessed March 21, 2021].
- 28) Скаун, А. А. и Липенков, В. Я. (2016). Исследование погрешностей орбитального метода датирования льда по данным о его газосодержании на примере ледяного ядра со станции Купол Фуджи (Антарктида). *Проблемы Арктики И Антарктики* 4, 14–29. doi: <https://www.aaresearch.science/jour/article/view/78/76>.
- 29) Федоров, В. М. (2015). Широтная изменчивость приходящей солнечной радиации в различных временных циклах. *Доклады Академии Наук* 460. doi: 10.7868/S0869565215030196.
- 30) Федоров, Костин, А. А., and Фролов, Д. М. (2020). Влияние формы Земли на характеристики облучения земной поверхности. *Геофизические процессы и биосфера* 19. doi: 10.21455/GPB2020.3-7.