

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. А.Ф. ИОФФЕ

На правах рукописи

Огурцов Максим Геннадиевич

**Солнечная активность и гелиоклиматические факторы –
долговременная эволюция и возможные сценарии
будущего развития**

Специальность 01.03.03 - Физика Солнца

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук



Санкт-Петербург - 2009

Работа выполнена в Физико-Техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Научный консультант: доктор физико-математических наук
Наговицын Юрий Анатольевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Обридко Владимир Нухимович

доктор физико-математических наук, профессор
Веселовский Игорь Станиславович

доктор физико-математических наук, профессор
Гельфрейх Георгий Борисович

Ведущая организация: Санкт-Петербургский филиал Института земного
магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН

Защита состоится 11 декабря 2009 года в 11-30 на заседании диссертационного совета Д 002.120.01 при Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук по адресу: 196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе 65, ГАО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАО РАН.

Автореферат разослан « 10 » ноября 2009 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук



Е.В. Милецкий

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена решению фундаментальных проблем солнечной и солнечно-земной физики: исследованию изменений солнечной активности на длительных – от сотен до нескольких тысяч лет – временных шкалах, изучению их возможного воздействия на климат Земли и физического механизма этой взаимосвязи, выявлению основных закономерностей, лежащих в основе временной эволюции активности Солнца.

Изучение временных вариаций солнечной активности представляет значительный интерес не только с точки зрения физики Солнца. Современная гелиогеофизика рассматривает активность Солнца как один из ведущих факторов, воздействующих на состояние околоземного пространства и, возможно, глобальные и локальные климатические колебания. Исследование земных проявлений долговременной эволюции магнитного поля Солнца активно развивается в последнее время благодаря своей практической актуальности. Уже накоплено немало достаточно убедительных свидетельств реальности влияния как кратковременных (не более нескольких суток), так и долгопериодных (десятки-сотни лет и более) вариаций солнечной активности (СА) на соответствующие изменения глобального и регионального климата Земли. Однако, неоспоримых доказательств существования солнечно-климатической связи (СКС) до сих пор не получено, так что дискуссия по данной проблеме продолжается. Кроме того, физический механизм, обеспечивающий СКС, также пока не выяснен. Можно лишь отметить, что всё большее число исследователей склоняется к мнению, что главную роль в обеспечении связи СА с климатом играют потоки космических энергичных частиц, эффективно модулируемых Солнцем. Для получения исчерпывающего ответа на указанные вопросы требуется совместное изучение колебаний различных параметров СА и климата на различных временных шкалах: от нескольких дней до сотен лет и более.

Экспериментальные измерения физических параметров активности Солнца, земного климата и различных космофизических факторов охватывают, в основном, не более нескольких десятков последних лет. В то же время, данные солнечной палеоастрофизики и палеоклиматологии способны заметно расширить наши знания. Обе эти научные дисциплины, активно развивающиеся в последние годы, дают возможность реконструировать временной ход различных параметров климата и активности Солнца на временных шкалах до нескольких тысяч лет и более. Анализ большого объёма информации, накопленного современными палеоастрофизикой и палеоклиматологией, и стал основным предметом исследования в данной диссертационной работе наряду с изучением прямых инструментальных данных. Следует отметить, что анализ подобных палеоданных зачастую требует применения специальных неординарных математических и статистических подходов, разработка и тестирование которых также стали одной из задач настоящей диссертации.

Актуальность темы исследований.

Воздействие СА на климат Земли представляется весьма вероятным, а на целый ряд процессов в околоземном пространстве – уже доказанным. Не вызывает сомнений влияние активности Солнца на так называемую *космическую погоду*. Этот термин, появившийся недавно, описывает физическое состояние околоземного пространства (высокие слои атмосферы, магнитосфера) в определённый момент или промежуток времени характеризуемое совокупностью гелиогеофизических параметров (интенсивность электромагнитных излучений и потоков солнечных космических лучей (СКЛ), степень ионизации, температура, скорость и плотность частиц солнечного ветра, интенсивность флуктуаций геомагнитного поля). Космическая погода, в свою очередь, способна значимо влиять на многие аспекты жизни современного человечества. Действительно, потоки высокоэнергичных частиц, образующихся во время мощных солнечных вспышек и корональных выбросов массы, могут нарушать радиосвязь, затруднять радионавигацию и повреждать оборудование спутников. Эти потоки

могут представлять опасность для здоровья космонавтов и даже пассажиров самолётов. Очевидно, что долговременное прогнозирование уровня активности Солнца и выявление долговременных тенденций космической погоды, определяющих *космический климат*, представляет собой задачи большой практической важности. Надёжный и точный долговременный прогноз возможен при наличии необходимой информации о колебаниях СА на длительных временных шкалах. Однако инструментальные данные о солнечной активности имеются только для последних 3-4 веков, а удовлетворительные данные о геомагнитной активности – всего лишь для последних 150 лет. Для того, чтобы восполнить знания о прошлом СА, приходится использовать методы солнечной палеоастрофизики – науки, имеющей целью реконструировать значения основных солнечных и космофизических параметров в прошлом, главным образом, на основе данных по концентрации космогенных изотопов и нитратов в земных архивах и данных исторических хроник. Можно отметить с другой стороны, что многие из естественных архивов палеоастрофизической информации (кольца деревьев, полярные льды) подвержены значительному воздействию климатических факторов. Это делает необходимым вовлечение климатических данных в процесс реконструкции солнечной активности в прошлом. Однако наши знания о прошлом климата Земли также весьма скудны и неточны. Действительно, инструментальные измерения температуры охватывают не более 100-150 последних лет и покрывают сравнительно небольшую (<20 %) часть земной поверхности. Знания о прошлом климата нашей планеты предоставляет палеоклиматология. Эта отрасль науки, интенсивно развивающаяся в последние годы, нацелена на восстановление временного хода температуры различных регионов Земли при помощи косвенных источников информации: колец деревьев, пыльцы растений, содержания стабильных изотопов во льдах и кораллах. Помимо палеоастрофизического приложения, актуальность палеоклиматических исследований самих по себе также весьма значительна. Действительно, влияние изменений земного климата практически на все аспекты социальной и экономической активности человечества очевидно, а в свете глобального потепления последних 100 лет этот вопрос приобретает особую остроту. Однако целый ряд ключевых вопросов климатологии до сих пор остается не выясненным. Является ли потепление последнего столетия действительно глобальным? Возникает ли оно только вследствие парникового эффекта, вызванного антропогенной активностью, или обусловлено также и рядом природных факторов – трендами СА и вариациями космофизических параметров? Какова роль региональных антропогенных изменений – урбанизации и землепользования? Могут ли давать вклад в глобальное потепление естественные климатические колебания? Ответы на эти вопросы должны помочь при выработке качественного прогноза изменений климата на ближайшие десятилетия и, следовательно, важны для всей современной цивилизации. Как и для СА, получение надёжного прогноза требует сведений о длительных изменениях земного климата в прошлом и их причинах, понимания физических процессов, происходящих в климатообразующей системе под действием факторов земного и солнечно-космического характера.

В диссертации проведено совместное изучение эволюции активности Солнца, климата Земли, различных космофизических факторов на длительных временных масштабах. Оно стало возможным благодаря развитию подходов палеоастрофизики и палеоклиматологии, получению новых экспериментальных данных, систематизации огромного количества накопленной информации, а также разработке и применению современных математических методов. Это – фактически новое направление, которое значительно расширяет перспективы решения обозначенных выше задач. Сведения о временном ходе активности Солнца и земного климата на длительных – до нескольких столетий и более – временных шкалах, основных причинах их колебаний и возможной взаимосвязи, физических механизмах лежащих в основе солнечно-климатических связей, необходимы для разработки долговременных (на десятки лет и более) и надёжных (с указанием вероятных пределов изменений параметров) солнечных и климатических прогнозов. Последние же, как представляется, чрезвычайно важны для выработки стратегии развития всего человечества в будущем и, следовательно, имеют огромную практическую ценность. Главным образом это и определяет актуальность диссертационной работы.

Цели работы

Как уже было отмечено, основным направлением, развиваемым в работе, является совместное изучение долговременной эволюции солнечной активности и климата Земли на основе подходов палеоастрофизики и палеоклиматологии. В свете этого основные цели диссертационной работы формулируются следующим образом:

- Разработка подходов и методик статистического анализа, имеющихся в распоряжении современной науки палеорядов.
- Систематизация накопленной палеоклиматической и палеоастрофизической информации.
- Реконструкция временного хода СА на длительных (тысяча лет и более) временных шкалах.
- Оценка качества и надёжности имеющихся солнечных палеореконструкций и выяснение точности заключённой в них информации.
- Количественный и качественный анализ временной эволюции СА и климата Земли на длительных временных шкалах, выяснение наличия связей между двумя этими процессами и её характера.
- Прояснение физического механизма, способного передавать солнечное воздействие на земной климат.
- Выработка сценария (прогноза) изменений активности Солнца и глобального климата Земли на ближайшие десятилетия.
- Разработка стратегии дальнейшего развития затронутых в работе научных направлений.

Таким образом, проведённая работа была нацелена на рассмотрение ряда важных вопросов солнечной, солнечно-земной физики и космофизики в свете полученных в последнее время палеоданных, охватывающих промежутки времени длиной до нескольких тысяч лет и позволяющих исследовать интересующие нас процессы на недоступных ранее длительных временных масштабах. Исследование производилось с использованием современных математических методов, в том числе их статистических приложений, разработанных в данной диссертации.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Верификация и тестирование качества имеющихся палеореконструкций солнечной активности произведены с помощью разработанной оригинальной методики, основанной на исследовании точности предсказания временного хода реальных (инструментально наблюдаемых) чисел солнечных пятен, производящегося с использованием тестируемого ряда в качестве источника информации. Подобные оценки принципиально важны для выработки стратегии извлечения наиболее надёжной информации из имеющихся солнечных реконструкций и её дальнейшей систематизации.

2. Числа солнечных пятен восстановлены на промежутке времени, охватывающем более 10 000 последних лет. Эта реконструкция, произведенная с использованием данных о концентрации радиоуглерода ^{14}C в кольцах деревьев при помощи современных палеоастрофизических методов, является одной из наиболее продолжительных среди имеющихся на сегодняшний день, и уже была использована для изучения наиболее длительных циклов солнечной активности и выработки сценария ее развития (п.7)..

3. Обнаружена квазистолетняя – с типичными временами от 60 до 130 лет – вариация в температуре Северного полушария Земли отчётливо выраженная на протяжении не менее 1000 последних лет и способная давать заметный (до 0.2°C и более) вклад в потепление первой половины XX века. Показано, что данный ритм обладает бимодальной частотной структурой, включая в себя 60-85 летнюю и 100-130 летнюю периодичности. Наличие аналогичной бимодальной структуры у квазистолетнего солнечного цикла Глайссберга подтверждено на

основе обширного палеоастрофизического материала. Причиной такого «детального» сходства квазипериодической структуры вариаций может служить связь Солнце-климат на вековой шкале времени.

4. На основе совместного анализа палеоастрофизической и палеоклиматической информации установлено, что эффект усиления слоёв сульфатного аэрозоля в стратосфере после мощных солнечных протонных событий, несколько раз экспериментально регистрировавшийся в последние 25 лет, неоднократно имел место и в доинструментальную эпоху, начиная, по крайней мере, с 1789 года. Это доказывает реальность данного эффекта и позволяет расширить временной интервал изучения влияния вспышечной активности Солнца на атмосферу Земли, почти на порядок - до более 200 лет.-

5. Обнаружена квазипятилетняя вариация концентрации нитратов (ионов NO_3^-) во льду центральной Гренландии. Показано, что данная периодичность, отчётливо выраженная с середины XIX века, связана с тем, что пиковые выбросы концентрации нитратов происходят главным образом на фазах подъёма и спада 11-летнего цикла солнечной активности. Поскольку космогенные резкие увеличения концентрации ионов NO_3^- в полярных льдах вызваны солнечными протонными событиями, обнаруженный эффект доказывает существование связи экстремальной вспышечной активности Солнца с периодами роста и спада 11-летнего цикла на протяжении более 150 последних лет.

6. Впервые предложена физически обоснованная интерпретация широко обсуждающегося явления: - парадоксальной связи между долговременными вариациями активности Солнца и приземной температуры, при которой температурный цикл на Земле опережает солнечный на 15-20 лет (см. Friis-Christensen and Lassen, 1991). Показано, что этот трудно объяснимый фазовый сдвиг, может возникать вследствие влияния на климат Земли квазистолетней вариации аэрозольной прозрачности стратосферы, вызванной соответствующими колебаниями потоков энергичных космических частиц солнечной и галактической природы. Оценки отклика климата Земли на долговременные изменения стратосферной прозрачности, произведённые с помощью одномерной энергобалансовой климатической модели, подтверждают физическую значимость данного эффекта в наблюдаемом явлении.

7. На основе анализа палеоастрофизической информации об активности Солнца на протяжении более 10 000 последних лет с использованием современных математических методов предложен сценарий эволюции среднего уровня СА в первой половине текущего столетия. Показано, что с точки зрения солнечной палеоастрофизики средний уровень СА в первой половине XXI века должен быть ниже, чем во второй половине XX века, с вероятностью 0.999. Таким образом, наступающий 24-й солнечный цикл ожидается средним по величине: относительное число пятен в максимуме достигнет 70-100 единиц. Вероятность мощного цикла (с максимальным числом Вольфа более 160 единиц), предсказываемого некоторыми авторами с помощью коротких по времени инструментальных рядов, оказывается равной менее 0.02.

8. Проведено исследование относительного вклада различных – природно-земных, космофизических, солнечных – климатообразующих факторов в глобальное потепление последних 100 лет. Показано, что точно оценить, вклад какого-либо из указанных факторов, включая эмиссию парниковых газов, изменения СА и космического климата, локальное антропогенное воздействие, земные климатические циклы, на сегодняшний день – вследствие недостаточности данных и имеющихся между ними неустранимых противоречий – не представляется возможным. Анализ всей совокупности полученных к настоящему моменту палеоданных позволил, однако, заключить, что если глобальное потепление вызвано влиянием природных (земных, солнечных, космофизических) причин, то средняя температура Северного полушария Земли в первой половине XXI века должна быть ниже, чем во второй половине XX

века с вероятностью более 0.75.

Научная новизна работы

Научная новизна проведённой работы состоит в следующем:

- Разработана оригинальная методика оценки значимости деталей глобального вэйвлетного спектра Морле, позволяющая судить о достоверности результатов статистического анализа квазипериодических рядов, с которыми мы и имеем дело в гелио- и геофизике.
- Разработана методика проверки качества реконструкций СА в доинструментальную эпоху.
- Обнаружен квазистолетний ритм в климате Северного полушария Земли, имеющий, как и солнечный цикл Глайссберга, бимодальную частотную структуру.
- Впервые продемонстрирована конструктивная возможность осуществления долговременного (на несколько десятилетий вперёд) и одновременно достаточно надёжного солнечного прогноза. Это стало возможным благодаря использованию данных современной солнечной палеоастрофизики и применению новых методов прогнозирования.

Получен ряд других выводов, имеющих отношение к солнечной и солнечно-земной физике, а также и к климатологии.

Практическое значение работы

Практическое значение диссертационной работы состоит в том, что:

- Разработанная методика оценки значимости деталей глобального вэйвлетного спектра Морле может быть использована при анализе сигналов в широком спектре научных дисциплин, включая геофизику, климатологию, технику и т.д.
- Полученная реконструкция активности Солнца на протяжении последних более 10 000 лет может быть использована как в солнечной физике (для изучения поведения различных циклов СА, для прогнозирования активности Солнца в будущем), так и в гелиогеофизике (для изучения климатических, геомагнитных и многих других аспектов солнечно-земных связей).
- Разработанная четырёхрезервуарная энергобалансовая модель климата Земли, учитывающая вклад космофизических факторов, может быть использована как отправной пункт в дальнейшем изучении основных закономерностей эволюции климата и физических процессов, лежащих в её основе.
- Полученные в работе результаты, убедительно доказывают значительную научную ценность палеоастрофизики и палеоклиматологии, перспективность их совместного использования и необходимость активного развития обеих научных дисциплин.

Исследования, представленные в диссертации, выполнены в ФТИ им. А.Ф. Иоффе в 1994-2007 гг.: в Лаборатории Ядерной космической физики (до 2004 г.), и в Лаборатории Космических лучей (после 2004 г.). Ряд совместных работ выполнен с коллегами из Университета Хельсинки, Университета Йёнсуу, ГАО РАН, ИСЗФ СО РАН, ИТПМ Казахстана.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы, включая подходы, методы и модели, были представлены на целом ряде международных и всероссийских научных конференций. Среди них:

- 16th International Radiocarbon Conference (Groningen, Netherland, 1997).
- International Workshop «News and views in physics and paleoastrophysics» (Helsinki-St. Petersburg, 1997).

- Международная конференция «Современные проблемы солнечной цикличности» (Санкт-Петербург, Пулково, 1997).
- Международная конференция «Крупномасштабная структура солнечной активности: достижения и перспективы» (Санкт-Петербург, Пулково, 1999).
- 26th International Cosmic Ray Conference (Salt Lake City, USA, 1999).
- Международная конференция «Солнце в эпоху смены знака магнитного поля» (Санкт-Петербург, Пулково, 2001).
- Climate change and variability in northern Europe, climate change symposium (Turku, Finland, 2002).
- Международная конференция «Солнечная активность и космические лучи после смены знака магнитного поля» (Санкт-Петербург, Пулково, 2002)
- International workshop «Cosmogenic climate forcing factors during the last millennium (Kaunas, Lithuania, 2003).
- Международная конференция «Климатические и экологические аспекты солнечной активности» (Санкт-Петербург, Пулково, 2003)
- Всероссийской конференции «Актуальные проблемы физики солнечной и звёздной активности» (Нижний Новгород, 2003).
- IAU Symposium № 223. Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity (St. Petersburg, 2004).
- First International Symposium on Space Climate: Direct and Indirect Observations of Long-Term Solar activity (Oulu, Finland, 2004).
- Международная конференция «Солнечная активность как фактор космической погоды» (Санкт-Петербург, Пулково, 2005).
- Международная конференция «Квазипериодические процессы на Солнце и их геоэффективные проявления» (Санкт-Петербург, Пулково, 2006).
- International heliophysical year: new insights into solar-terrestrial physics (IH2007-NISTP) (Zvenigorod, 2007).
- Международная конференция «Физическая природа солнечной активности и прогнозирование её геофизических проявлений». (Санкт-Петербург, Пулково, 2007).
- 7th International Conference “Problems of geocosmos” (St. Petersburg, 2008).

Различные аспекты работы были поддержаны 14-ю отечественными и международными грантами: программой российско-финского межакадемического обмена (проект №16), грантом ИНТАС 2001-00550, грантами РФФИ 99-02-18398-а, 03-02-17505, 04-02-17560, 03-04-48769, 06-02-16268, 07-02-00379, 09-02-00083, программами Президиума РАН «Нестационарные явления в астрономии» и «Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце-Земля», грантами Санкт-Петербургского научного центра за 2006-2008 годы.

Результаты, полученные в работе, входили в списки «Важнейших достижений в области астрономии» Научного совета по астрономии ОФН РАН (2004) и междисциплинарного научного совета «Солнце-Земля» РАН (2008).

Личный вклад соискателя и публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 70 работ, из них 31 в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов докторской диссертации. Без соавторов написано 10 статей. В совместных исследованиях автору принадлежит, главным образом, постановка задач, разработка методов анализа данных, интерпретация результатов.

Структура и объём

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, включающего 732 наименования, и шести приложений. Полный объём диссертации 292 страницы, включая 125 рисунков и 26 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

В начале введения даётся определение основных исследуемых в диссертационной работе физических процессов: солнечной активности, космической погоды, земного и космического климата. Затем обосновывается актуальность и практическое значение темы исследований: анализа долговременной эволюции СА и климата Земли, их возможной взаимосвязи и её физического механизма. Кратко излагается история гелиоклиматических исследований, начиная с 17 века. Отмечается, что, несмотря на долгий период изучения, неоспоримых доказательств воздействия СА на климатические процессы до сих пор получено не было. В связи с чем, классические метеорология и климатология нередко пренебрегают влиянием активности Солнца на климат Земли. Основные их критические замечания в адрес гелиоклиматологии можно суммировать в следующем виде:

1) Связи между солнечной активностью и явлениями погоды и климата исследуются, в большинстве случаев, без должной строгости. Упоминаемые во многих работах солнечно-климатические связи оказываются неустойчивыми во времени и пространстве – то появляются, то исчезают, меняются знаки корреляций и т. д. Никаких реальных оснований говорить о причинных связях между СА и климатом не имеется.

2) Механизм предполагаемого воздействия солнечной активности на атмосферу неизвестен. Энергетика земных проявлений активности Солнца (магнитные бури, потоки частиц и т.п.) слишком слаба, чтобы воздействовать на глобальную погоду и климат.

3) Прогноз СА на сроки, интересные с точки зрения климатологии, невозможен. Возможности долгосрочного предсказания солнечной активности в принципе исчерпываются экстраполяцией данных о пятнообразовательной деятельности Солнца, базирующейся на её циклических компонентах. Как следствие, качество этих прогнозов неудовлетворительно.

Такая критика признаётся не лишённой оснований, но указывается, что подобное положение дел может быть связано с недостатком информации, использовавшейся до сих пор в гелиоклиматологии: большинство из инструментальных измерений различных параметров СА, космической погоды и климата приходится на временной интервал, охватывающий не более нескольких последних десятилетий. Причём данный период в истории СА и солнечно-земных связей, возможно, не вполне обычен. Выдвигается предположение, что использование полученных в последнее время данных солнечной палеоастрофизики и палеоклиматологии способно существенно расширить горизонт наших знаний о прошлом процессов, протекающих в системе Солнце-Земля, и помочь преодолению имеющихся трудностей. Даётся краткое описание современных солнечной палеоастрофизики и палеоклиматологии, включающее некоторые исторические экскурсы, перечисление основных достижений, сложностей и затруднений. Делается вывод, что в силу ряда присущих гелиогеофизическим рядам и палеоданным особенностей, для извлечения точной и надёжной информации из них желательна разработка методики статистического анализа, в максимальной степени, учитывающей их особые свойства. На основании всего изложенного сформулированы основные цели работы.

Глава 1

Первая глава посвящена разработке методов статистического анализа реальных солнечных и климатических временных серий. Сформулированы основные цели и задачи статистического анализа гелиогеофизических сигналов.

В разделе 1.1 разработана методика исследования спектрального состава изучаемых природных сигналов. В начале главы, даётся определение стационарности временной серии, перечисляются основные типы нестационарности и указывается на то, что естественным солнечным и климатическим рядам, как правило, присущи все перечисленные типы. Отмечается, что анализ подобных сильно нестационарных временных серий представляет собой непростую задачу. Действительно, стандартное преобразование Фурье (ПФ) –

разложение по бесконечно осциллирующим синусоидам - для изучения квазипериодических нестационарных сигналов не слишком пригодно, оконное ПФ также имеет недостатки. Избежать описанных затруднений помогает разложение исследуемого ряда по вэйвлетам – функциям, хорошо локализованным во времени и частоте. Вэйвлетное преобразование (ВП) функции $f(t)$:

$$w(a, t) = a^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t') \psi^* \left(\frac{t-t'}{a} \right) dt', \quad (1)$$

где $\psi(t)$ - анализирующий вэйвлет,

a – параметр, определяющий растяжение базисного вэйвлета,

t' - параметр, определяющий положение вэйвлета $\psi(t)$ во времени,

позволяет извлекать достаточно точную и надёжную информацию о спектральном составе нестационарных сигналов и его временной эволюции. Для подобных исследований выбирается комплексный вэйвлетный базис $\psi(t)$ (обычно базис Морле) и строится вэйвлетный спектр – квадрат ВП. Однако встаёт вопрос об оценке значимости различных областей вэйвлетного спектра – вероятности того, что данная деталь спектра порождена реальным квазипериодическим сигналом, а не индуцирована шумом. Показано, что метод, применявшийся для подобных целей ранее, как минимум неточен, и может приводить к значительным ошибкам. В связи с этим был разработан принципиально новый полуэмпирический метод определения значимости деталей локального вэйвлетного спектра Морле. Он основан на сопоставлении спектра исследуемой серии с набором фоновых спектров - спектров сигналов, представляющих собой сумму синусоиды и шума. Синусоидальная вариация, входящая в каждый из этих сигналов имеет одинаковую и заданную заранее значимость X (она задается необходимым соотношением сигнал/шум), а частота синусоиды меняется в интересующих нас пределах. Анализ вэйвлетного спектра этих тестовых рядов, включающих в себя синусоиды с разными частотами и заданной значимостью, определяет уровень значимости спектра Морле $P_X(\omega)$.

С учётом данной методики была разработана следующая схема статистической обработки естественных гелиогеофизических временных серий:

1) Предварительное «отбеливание» ряда данных путём удаления долговременных трендов – временных вариаций с периодами, сопоставимыми с длиной интервала наблюдений.

2) Оценка среднего по времени частотного спектра сигнала при помощи спектра Фурье (квадрата преобразования Фурье). Значимость пиков спектра при этом определяется стандартными теоретическими методами, основывающимися на простой χ^2 статистике. Взвешивание преобразования Фурье при помощи каких-либо корреляционных окон не применяется, т.к. оно искажает статистику распределения спектральных пиков, делая большинство теоретических методов оценки малопригодными. Амплитуды обнаруженных периодичностей вычисляются путём интегрирования спектра Фурье.

3) Оценка временной эволюции спектральных характеристик сигнала при помощи локального вэйвлетного спектра Морле. Значимость деталей спектра оценивается с помощью описанной выше полуэмпирической методики включающей набор (обычно несколько сотен) монте-карловских розыгрышей. Глобальный спектр Морле может быть использован для дополнительной оценки среднего по времени спектра.

4) Проведение сингулярного спектрального анализа (ССА) исследуемого сигнала. Для этого анализируемый ряд данных раскладывается по собственным функциям автокорреляционной матрицы. Получается набор т.н. главных компонент сигнала, каждая из которых восстанавливает определённый процент полной дисперсии. Анализ главных компонент позволяет проследить временную эволюцию временной серии на разных шкалах времени, а, если главные компоненты более или менее близки к синусоидам спектра Фурье, то можно оценить амплитуды соответствующих периодичностей.

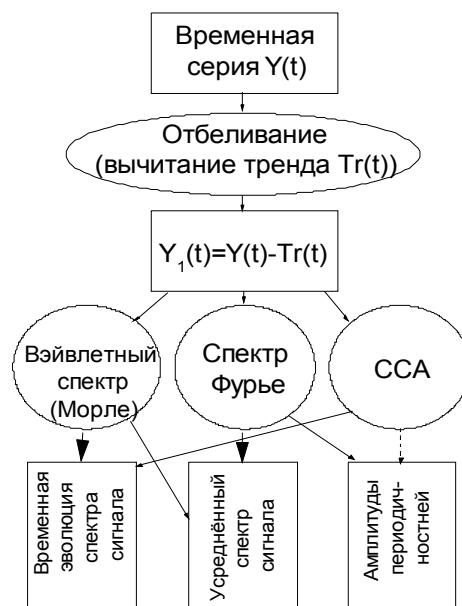


Рисунок 1. Схема методики статистического анализа, применявшейся при изучении природных временных серий.

Анализ рядов данных по описанной схеме, делает возможным в сложных случаях (сильно нестационарный сигнал необычной формы) оценивать каждый из его основных параметров - усреднённый спектр, эволюцию спектра во времени, амплитуды временных вариаций – как минимум двумя способами. Это позволяет значительно улучшить надёжность извлекаемой из палеосерий информации.

В разделе 1.2 описаны подходы к фильтрации природных временных серий. Показано, что наиболее пригодной для работы с естественными солнечными и климатическими сигналами является вэйвлетная фильтрация с использованием вещественного базиса МНАТ (Mexican hat). Обычное сглаживание скользящим средним также может использоваться в качестве дополнительного источника информации. Разработаны оригинальные методики оценки значимости корреляции между фильтрованными и сглаженными сигналами.

В разделе 1.3 суммированы результаты данной главы, а в разделе 1.4 перечислены основные трудности и направления дальнейших исследований. Показано, что и в Фурье-анализе, и в вэйвлетном анализе, и в ССА целый ряд процедур, важных при оценке значимости, осуществляется на достаточно произвольной основе, без строгого математического обоснования. Это означает, что статистический анализ гелиогеофизических сигналов по прежнему несёт в себе элемент субъективизма, на устранение которого и должна быть нацелена дальнейшая работа.

Глава 2

Вторая глава посвящена исследованию современного состояния дел в области солнечной палеоастрофизики. В разделе 2.1 подробно рассмотрено современное состояние дел в области палеоастрофизики космогенных изотопов. Дан краткий очерк истории радиоуглеродных и бериллиевых исследований. Описан механизм образования космогенных изотопов в атмосфере Земли и цепочка природных процессов, обеспечивающая связь концентрации ^{14}C и ^{10}Be в естественных архивах с интенсивностью галактических космических лучей (ГКЛ).

Произведён статистический анализ всей совокупности имеющейся на сегодняшний день информации о содержании космогенных изотопов ^{14}C и ^{10}Be в естественных архивах. Анализ подтвердил её значительную ценность для солнечной палеоастрофизики. При этом радиоуглеродные данные оказались несколько менее информативными, чем бериллиевые, т.к.

они позволяют исследовать, главным образом, вековые (периоды от нескольких десятилетий до нескольких сотен лет) вариации СА. Выделение солнечно-обусловленных вариаций $\Delta^{14}\text{C}$ на коротких (периоды менее 30 лет) и длинных (тысячи лет) временных масштабах затруднено, из-за неопределённости наших знаний о (а) процессах распространения радиоуглерода в океанических водах, (б) долговременных вариациях геомагнитного поля, (в) влиянии на $\Delta^{14}\text{C}$ региональных климатических условий.

Что касается бериллиевых рядов, то они содержат сведения также о кратковременных (периоды менее 30 лет) колебаниях активности Солнца, и, возможно, об изменениях СА на временных шкалах в тысячи лет. Более того, концентрация ^{10}Be в полярном льду, измеренная с хорошим разрешением, может оказаться пригодной и для тестирования внутренней динамики солнечной активности.

Получена реконструкция чисел солнечных пятен на протяжении более 10 000 последних лет. Она была произведена с использованием данных о концентрации радиоуглерода ^{14}C в кольцах деревьев Северного полушария Земли при помощи современных палеоастрофизических методов. Данная реконструкция является одной из наиболее длинных среди имеющихся на сегодня..

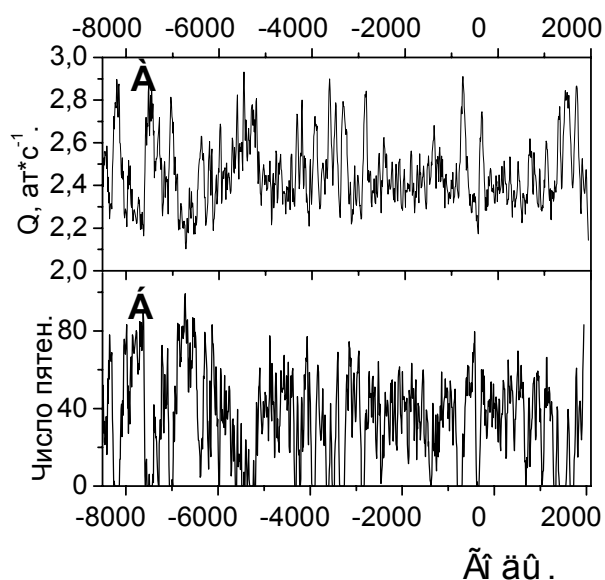


Рисунок 2. А – восстановленная скорость образования радиоуглерода в атмосфере; Б – число групп солнечных пятен, R_{OG2} восстановленное в работе Ogurtsov (2005).

Произведён *R/S* и *DFA* анализ имеющейся на сегодня информации о солнечной активности, включающей как данные инструментальных измерений, так и палеоданные. Получены новые указания на наличие настойчивости и эффектов долговременной памяти у активности Солнца.

Произведён анализ совокупности палеоданных об активности Солнца в период Маундеровского минимума (1645-1715 гг.). Показано, что вариации СА в указанную эпоху, скорее всего, носили характер беспорядочных флуктуаций распределённых во времени случайным образом, хотя существование слабой 11-летней цикличности полностью исключить нельзя. Высказанная рядом авторов гипотеза о том, что СА во время Маундеровского минимума испытывала 22-летнюю вариацию не нашла подтверждения.

Разработана и опробована методика верификации имеющихся в распоряжении современной науки реконструкций солнечной активности в доинструментальную эпоху (до 1615 г.), охватывающих промежутки времени до 10 тысяч последних лет. Методика основывается на исследовании возможности предсказания реальных чисел солнечных пятен, определённых путём телескопических наблюдений, с использованием солнечных рядов, восстановленных методами палеоастрофизики в качестве источника информации. Тестирование нескольких различных палеекострукций, проведённое на временных интервалах длиной до

10 тысяч лет, показало, что они содержат сведения о качественных особенностях временного хода солнечной активности, но не слишком пригодны для извлечения количественной информации. Это означает, что первоначальный энтузиазм по поводу возможностей использования космогенных изотопов для реконструкции прошлого интенсивности ГЛ и СА оказался несколько преувеличенным. Соответственно, анализ солнечных палеорекоonstrukций оказывается непростой задачей, решение которой требует особых подходов, наиболее перспективным из которых является применение принципа «независимых свидетелей».

Показано, что возникшая недавно гипотеза о том, что текущий уровень активности Солнца является наивысшим за последние 8000 лет, представляет собой лишь произвольное предположение, которое при сегодняшнем уровне знаний о прошлом нашего светила не может быть ни подтверждено, ни опровергнуто.

В разделе 2.2 рассмотрено современное состояние дел в области нитратной палеоастрофизики. Описан механизм образования ионов NO_3^- в атмосфере Земли и их фиксации в природных архивах. Показано, что пики концентрации ионов в полярных льдах могут служить палеоастрофизическим индикатором мощных солнечных протонных событий.

Обнаружена квазипятилетняя вариация концентрации нитратов $[\text{NO}_3^-]$ во льду центральной Гренландии. Показано, что данная периодичность, особенно заметная с середины XIX века, вызвана резкими увеличениями концентрации нитратов на фазах подъёма и спада чисел Вольфа. Это может означать, что связь наиболее мощных солнечных протонных событий с периодами роста и спада 11-летнего цикла является устойчивой чертой экстремальной вспышечной активности Солнца на протяжении почти полутора последних столетий.

Обнаружена квазивековая (период 60-90 лет) вариация концентрации нитратов $[\text{NO}_3^-]$ во льду центральной Гренландии. Показано, что данная периодичность развивается с опережением по фазе векового цикла в числах солнечных пятен. Таким образом, найден ещё один геофизический индекс, обладающий вековой вариацией опережающей солнечный цикл Глайссберга.

Обнаружена корреляция между вековыми цикличностями в концентрации нитратов во льду центральной Гренландии и температуре в северной Фенноскандии. Эта зависимость существует на протяжении нескольких последних веков. Она может означать, что атмосферные окислы азота NO_x вовлечены в цепочку геофизических и геохимических процессов, связывающих СА с климатом северо-атлантического региона Земли.

В разделе 2.3 суммированы результаты данной главы, а в разделе 2.4 перечислены основные трудности и направления дальнейших исследований. Отмечено, что, сведения о солнечной активности, содержащиеся в современных палеорекоonstrukциях, как правило, не слишком точны. Поэтому извлечение информации о прошлом СА требует применения принципа «независимых свидетелей». В этой связи, поиск и вовлечение в исследование новых «независимых свидетелей» - независимых источников информации о прошлом нашего светила - представляется основным направлением дальнейшей работы.

Глава 3

Третья глава посвящена исследованию квазистолетней (квазивековой) цикличности в активности Солнца и глобальном климате Земли.

Раздел 3.1 связан с изучением вековой цикличности в активности Солнца. В этом разделе сначала оценены точность и надёжность таких показателей активности Солнца как наблюдения солнечных пятен, производившиеся при помощи телескопов и невооружённым глазом и северные сияния. Показано, что неопределённость в телескопных данных о числе групп солнечных пятен в XVII-XVIII веках достигает фактора 2, а в периоды низкой активности Солнца и ещё худшей. Это означает, что данные наблюдателей XVII-XVIII веков содержат лишь приблизительные качественные сведения об активности Солнца в указанные эпохи. Утверждение американских астрономов Д. Хойта и К. Шаттена о том, что число групп пятен в

1653-1728 гг. известно надёжно и точно (Hoyt and Schatten, 1998) не подтвердилось.

Установлено, что квазивековая цикличность СА – цикл Глайссберга – представляет собой не вариацию с периодом 80-90 лет, но является цикличностью сложной формы и имеет широкую частотную полосу (периоды 50-130 лет). Структура квазидвухсотлетнего цикла Зюсса, оказалась более простой - его период изменяется в пределах 170-260 лет.

В разделе 3.2 дан краткий очерк современной палеоклиматологии. Перечислены основные достоинства и недостатки основных палеоиндикаторов температуры - колец деревьев, пыльцы растений, концентрации стабильных изотопов (^{18}O , ^{13}C , D) во льдах и кораллах, данных летописей и исторических хроник.

Раздел 3.3 посвящён статистическому анализу двух региональных и шести глобальных реконструкций температуры в Северном полушарии, произведённый на временном интервале 1000-1930 гг.

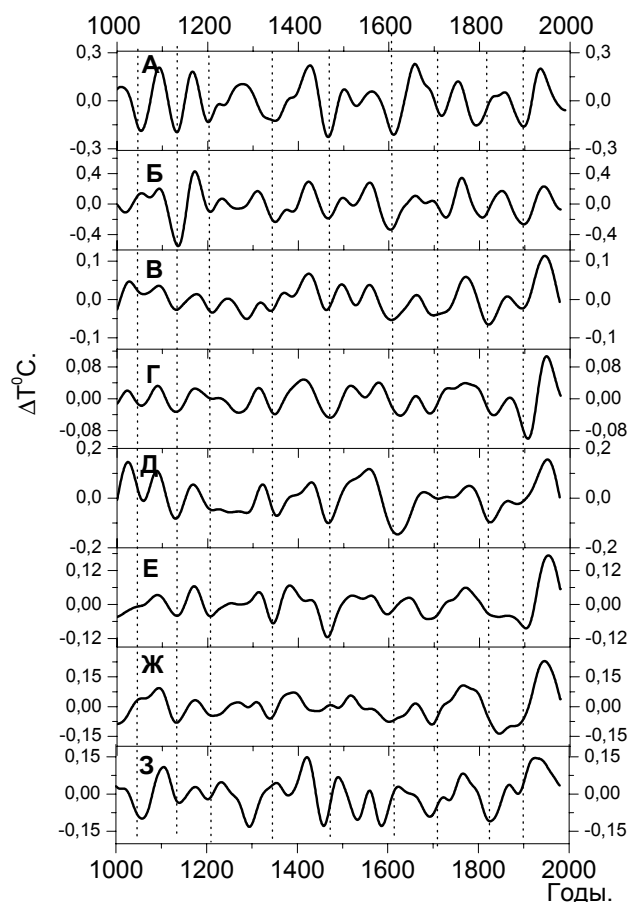


Рисунок 3. Температурные реконструкции вэйвлетно фильтрованные в полосе 55-147 лет: **А** – ряд Lindholm and Eronen (2000); **Б** – ряд Briffa et al. (1990); **В** – ряд Briffa (2000); **Г** – ряд Crowley and Lowery (2000); **Д** – ряд Esper et al (2002); **Е** – ряд Mann et al. (1999); **Ж** – ряд Jones et al. (1998), **З** – ряд Moberg et al. (2005).

Анализ показал присутствие в климате Северного полушария общего квазистолетнего ритма – см. рисунок 3. Этот полушарный ритм состоит из двух временных вариаций с периодами 50-85 лет и 100-135 лет, т.е. его спектральный состав близок к спектру вековой солнечной цикличности. Средняя амплитуда колебаний глобального квазивекового цикла достигает 0.2°C от пика к пику. Таким образом, указанный климатический ритм может давать ощутимый вклад в глобальное потепление первой половины 20 века.

Определённая синхронность между квазистолетней климатической вариацией и вековым циклом в концентрации ^{10}Be обнаружена для последних пяти веков. Однако, корреляционный анализ вышеописанных реконструкций СА и температуры в Северном полушарии, проведённый для полного тысячелетнего промежутка времени, не выявил взаимосвязи между вековыми колебаниями в указанных сериях. Отдельные солнечные и климатические палеоряды

обнаруживают корреляцию на вековой шкале времени, но для большинства изученных серий такая связь не найдена. Это значит, что чисто случайный характер сходства спектров квазивековой вариации климата Северного полушария и солнечного цикла Глайсберга не может быть полностью исключён. Более вероятным объяснением может служить нелинейный характер солнечно-климатической связи. Указания на нелинейность связи между квазистолетними колебаниями СА и температуры были получены при помощи методов кросс-предсказания. Если связь действительно сложная, анализ коэффициента линейной корреляции недостаточен для выявления зависимости между исследуемыми величинами. Помимо этого, следует учитывать, что квазистолетние климатические колебания естественного земного происхождения способны заметно искажать соответствующие солнечно-обусловленные циклы.

Были получены новые свидетельства влияния активности вулканов на колебания глобального климата Земли на мультидекадной (несколько десятилетий) временной шкале.

В разделе 3.4 суммированы результаты данной главы, а в разделе 3.5 перечислены трудности и направления дальнейших исследований. Отмечено, что основной причиной затруднений в области поиска долговременных солнечно-климатических связей является невысокое качество солнечных и, особенно, климатических палеоиндикаторов. Несмотря на значительные успехи, методы и подходы палеоклиматологии пока ещё оставляют значительный простор субъективизму. Наименее достоверной представляется палеоклиматологическая информация о вариациях температуры с периодами длиннее ста лет. Развитие методов палеоклиматологии, нацеленное на извлечение более точной и надёжной информации о прошлом климата Земли, является важнейшим направлением дальнейших исследований. Другим перспективным направлением работы в ближайшем будущем представляется продолжение поиска нелинейной связи между долговременными циклическими изменениями СА и климата. Усовершенствование методов статистического анализа, особенно подходов нелинейной динамики, также было бы полезным для решения поставленных задач.

Глава 4

Четвёртая глава посвящена исследованию возможного физического механизма связи между вариациями солнечно-космических факторов и колебаниями климата Земли. Дана краткая историческая справка по солнечно-климатическим исследованиям, показана важность проблемы.

В разделе 4.1 перечислены имеющиеся на сегодняшний день экспериментальные подтверждения реальности воздействия активности Солнца на атмосферу Земли.

В разделе 4.2 показано, что квазистолетние колебания температуры в Северном Полушарии в последние 130 лет хорошо коррелируют с циклом Глайсберга в СА, но опережают его по фазе на 15-20 лет, причем этот эффект, ранее установленный для глобальной среднегодовой температуры (Friis-Christensen and Lassen, 1991) выражен и в региональной температуре северной Скандинавии в течение трех последних веков.

Раздел 4.3 посвящён исследованию космической (межпланетной и межзвёздной) пыли, выпадающей в атмосферу Земли, как климатообразующего фактора. Показано, что вариации потоков межпланетной пыли способны давать ощутимый вклад в изменения климата. Что касается возможного влияния на климат присутствующей в атмосфере межзвёздной пыли, поток которой, в принципе, может регулироваться солнечным циклом Хейла, то оно оказалось крайне незначительным. Оценка оптической толщи межзвёздной пыли была произведена с использованием теории Ми и оптических параметров астрономического силиката.

В разделе 4.4 произведён анализ ряда палеоклиматических и палеоастрофизических временных рядов. На основании результатов был сделан вывод, о том, что одной из причин парадоксальной взаимосвязи квазистолетних циклов в СА и климате, отмеченной в разделе 4.2, может служить воздействие на климатическую систему долговременной вариации аэрозольной прозрачности атмосферы, вызванной колебаниями атмосферной ионизации под действием вековых циклов в интенсивности галактических и солнечных космических лучей. Были

получены указания на то, что атмосферно-оптический механизм связи погоды и климата с СА осуществляемый последовательностью: *СА → потоки ионизирующих частиц → атмосферная ионизация → концентрация стратосферного аэрозоля → прозрачность атмосферы → наземная солнечная радиация → приземная температура*, действует в высокоширотной части Северного Полушария на протяжении 4-5 последних столетий. Этот механизм был разработан на основе анализа коротких (от нескольких суток до 10-15 лет) экспериментальных временных серий (см. Пудовкин и Распопов, 1992; Распопов и др., 1998). Пригодность данного физического механизма для объяснения солнечно-климатических связей на значительно более длительной временной шкале свидетельствует в пользу его реальности и фундаментального характера. В этом же разделе при помощи разработанной одномерной энергобалансовой климатической модели произведены численные эксперименты, которые подтвердили возможность эффективного влияния долговременных вариаций аэрозольной прозрачности стратосферы на климат всего Северного полушария Земли.

В разделе 4.5 произведён анализ палеоданных по концентрации нитратов и электропроводности гренландского льда. Оказалось, что пиковые выбросы в обоих рядах в течение более двух последних столетий (начиная с 1789 г.) неоднократно совпадали по времени. Показано, что обнаруженные совпадения мощных нитратных пиков и всплесков проводимости, скорее всего, вызваны увеличением концентрации частиц стратосферного аэрозоля субмикронного и микронного размера, возникающим при резких усилениях ионизации во время солнечных протонных событий. Это явление было обнаружено экспериментально в феврале 1984 г. (Shumilov et al., 1996) и с тех пор несколько раз наблюдалось при помощи лидаров и спутниковой аппаратуры. Полученный результат позволяет расширить интервал существования вышеописанного эффекта с 24 до более 200 лет и доказывает реальность связи *ионизация атмосферы → концентрация аэрозоля*, представляющей важнейший элемент цепочки процессов входящих в атмосферно-оптический механизм солнечно-космической связи. Наиболее вероятным физическим процессом, обеспечивающим указанные атмосферные явления, представляется усиление ион-индуцированной нуклеации - вызванное ростом ионизации увеличение скорости генерации термодинамически устойчивых молекулярных кластеров, способных к дальнейшему росту. Исследование процессов коагуляции и конденсации при стратосферных условиях показало, однако, что для того, чтобы образовавшийся стабильный кластер вырос до субмикронных размеров требуется не менее нескольких месяцев, в то время как временной сдвиг между экспериментально зарегистрированными усилениями аэрозольных слоёв и протонными событиями не превышает нескольких суток. Таким образом, физика обнаруженного природного явления нуждается в дальнейшем исследовании. Образование дополнительных полярных стратосферных облаков, вызванное как увеличением концентрации окислов азота, так и ростом ионизации также может играть определённую роль. Нельзя исключить и возможность влияния на атмосферу микроволнового и ультрафиолетового солнечного излучения.

В этом же разделе показано, что воздействие СА на атмосферу Земли может оказаться значительно опосредованным естественно-природными и антропогенными факторами, т.е. осуществляться непрямым, сложным и нелинейным способом. Помимо этого, солнечно-обусловленные вариации климата могут дополнительно искажаться собственными колебаниями в климатической системе не связанными с активностью Солнца. Поэтому, неустойчивость и нестабильность солнечно-климатических эффектов, на которые нередко обращают внимание климатологи, сами по себе вряд ли могут считаться серьёзными аргументами против существования связи СА с климатом.

Раздел 4.6 посвящён исследованию ещё одного потенциального космофизического источника тысячелетних осцилляций климата - взаимодействия Земли с кометно-метеороидным комплексом Таурид. В начале раздела на основе анализа современных палеоклиматических данных оказано, что климатическая вариация с периодом 2.0-2.5 тысяч лет (цикл Халльстатцайта), возможно, вызвана не глобальным колебанием полного количества тепла, содержащегося в нижней атмосфере Земли, но изменением распределения неизменного количества тепла между различными географическими регионами нашей планеты. Такие

изменения в региональном распределении энергии возникают при соответствующих трансформациях атмосферной циркуляции. Произведены качественные оценки возможных климатических последствий падения в океан астероида, принадлежащего комплексу Таурид, сопровождающегося энерговыделением в $2 \cdot 10^3$ Мт ТНТ. Показано, что такое событие приведёт к катастрофическому разрушению озонового слоя и, как следствие, к значительным переменам в системе циркуляции атмосферы. Это означает, что падение каменного астероида с диаметром 250 м, скоростью 25 км/с, и плотностью $3 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ случающееся примерно раз в 2.5 тысячи лет (периоды пересечения орбиты Земли ядром комплекса Таурид) способно давать определённый вклад в 2400-летнюю временную вариацию земного климата, главным источником которой предположительно является соответствующая солнечная цикличность. Полученные свидетельства возможной синхронности двух климатообразующих ритмов принципиально различной (солнечной и чисто космической) природы подчёркивают необходимость тщательного учёта космофизических факторов при исследовании солнечно-космических связей

В разделе 4.7 суммированы результаты данной главы, а в разделе 4.8 перечислены трудности и направления дальнейших исследований. Отмечено, что достоверность и точность ряда палеоиндикаторов, использованных в работе, далека от идеальной. Поэтому, для дальнейших исследований было бы желательным использовать дополнительный материал, а ещё лучше - найти палеоиндикаторы атмосферной ионизации и концентрации стратосферного аэрозоля более надежные, чем концентрация нитратных и сульфатных ионов в полярных льдах. По-прежнему, много неясного сохраняется в физике образования аэрозолей и облаков в атмосфере. В этом направлении требуются новые исследования, в первую очередь экспериментальные. Необходимы также дальнейшие исследования воздействия потоков космических лучей на циркуляцию атмосферы ещё одного перспективного пути для обеспечения солнечно-климатической связи. Нужны более точные и надёжные оценки возможных климатических последствий столкновения астероида с Землёй, что требует дальнейшего прогресса в нашем знании о химии атмосферы и её влиянии на атмосферную циркуляцию, особенно, на длительных временных шкалах.

Глава 5

Пятая глава диссертации посвящена исследованию глобального потепления нашей планеты. Вопрос о росте среднеглобальной температуры поверхности Земли – глобальном потеплении – активно дебатировался последние несколько десятилетий и давно уже вышел за чисто научные рамки. Поскольку, среди возможных причин, вызвавших глобальное потепление, нередко указываются солнечные и космофизические факторы, данный вопрос также был рассмотрен в диссертационной работе. В разделе 5.1 изучены инструментальные (наземные термометрические и спутниковые) климатические данные, полученные в последние 10-100 лет. Показано, что они не лучшим образом согласуются друг с другом и не содержат неоспоримых доказательств парникового характера глобального потепления.

В разделе 5.2 глобальное потепление рассмотрено в свете данных палеоклиматологии. Показано, что анализ всей совокупности накопленной информации о глобальной температуре Земли, включающей как данные инструментальных измерений, так и косвенные палеоиндикаторы температуры позволяет сделать лишь следующие выводы:

(а) Среднеглобальная температура Земли в 20-м веке росла.

(б) XX век был тёплым, в том смысле, что средняя температура Земли в 1900-2000 гг. была выше, чем средняя температура в период 1000-2000 гг.

Однако, оценить амплитуду произошедшего ГП трудно, как из за недостатка информации, так и вследствие расхождений между имеющимися данными, которые особенно заметны с конца 70-х гг. XX века. Вопрос о том, является ли подъём температуры в последнем столетии беспрецедентным или сходные потепления уже имели место в прошлом, также остаётся открытым, поскольку различные температурные палеорекострукции не согласуются друг с другом и описывают принципиально разные версии температурной истории последнего

тысячелетия.

Раздел 5.3 посвящён исследованию глобального потепления с помощью методов климатического моделирования. Изучены радиационные форсинги (возмущения, вносимые в радиационный баланс атмосферы Земли) связанные с факторами, потенциально ответственными за подъём среднеглобальной температуры в течение последних более 100 лет, включая антропогенную эмиссию парниковых газов, рост активности Солнца, региональное антропогенное воздействие (ирригация, опустынивание, сведение лесов), естественные климатические циклы. Показано, что оценить вклад какого-либо из вышеперечисленных факторов в глобальное потепление на сегодняшний день не представляется возможным вследствие крайней неопределённости наших знаний о них. Показано, также, что при произвольном манипулировании радиационными форсингами без обоснования критериев выбора, что нередко встречается в практике современного климатического моделирования, значительную часть подъёма глобальной температуры в XX веке, можно объяснить, вообще не прибегая к гипотезе об индустриальном парниковом эффекте.

В разделе 5.4 была предпринята попытка осуществить долгосрочный прогноз изменения глобальной температуры Земли в XXI веке. Оказалось, что имеющиеся в нашем распоряжении противоречивые, а, подчас, и конфликтующие друг с другом данные, позволяют, тем не менее, рассмотреть три возможных сценария развития глобального климата: (а) если глобальное потепление действительно беспрецедентно и связано с индустриальным парниковым нагревом, то в ближайшие десятилетия значительный рост средне-глобальной температуры продолжится. (б) Если глобальное потепление не является уникальным в историческом контексте и представляет собой результат развития климатических циклов естественной (земной, солнечной, космической) природы, то средняя температура Северного полушария нашей планеты в ближайшие 40-50 лет, должна быть ниже, чем во второй половине XX века с вероятностью более 0.75. (в) Если глобальное потепление является результатом сложной совокупности целого ряда климатических процессов, включая антропогенную эмиссию парниковых газов (как индустриальную, так и сельскохозяйственную), воздействие естественно-природных факторов (изменения СА, космического климата то собственные колебания климатической системы), антропогенные изменения ландшафта, произвести даже качественный прогноз изменений глобального климата в текущем столетии практически невозможно.

Указанные сценарии проиллюстрированы рисунком 4.



Рисунок 4. Возможные сценарии климатической эволюции в XXI веке: **А.** Изменение средне-глобальной температуры Земли при условии, что ГП двадцатого века было вызвано индустриальным парниковым эффектом. **Б.** Изменение средней температуры Северного полушария при условии, что ГП двадцатого века было вызвано естественно-причинными причинами солнечного, космофизического и земного характера. **В.** Изменение температуры при условии, что ГП двадцатого века было вызвано комплексом причин антропогенного и естественно-природного характера.

В разделе 5.5 суммированы результаты данной главы, а в разделе 5.6 перечислены трудности и направления дальнейших исследований. Отмечено, что согласно проведённому в диссертации исследованию, предположение об индустриально-парниковом характере глобального потепления, лёгшее в основу Киотского протокола и воспринимаемое климатологами, принадлежащими к Межправительственной группе экспертов по изучению климата (IPCC), в качестве догмы, следует рассматривать лишь как гипотезу средней степени

правдоподобия. Эта гипотеза выглядит привлекательной, с точки зрения объяснения значительного роста глобальной температуры в последние свыше 100 лет, но нуждается в серьёзной дальнейшей разработке и дополнительном обосновании.

Указано, что недостаток надёжной информации является основным препятствием для выяснения причин и характера глобального потепления. Тщательный и непрерывный глобальный мониторинг как можно большего числа атмосферно-погодных и климатических параметров наряду с дальнейшим развитием методов палеоклиматологии представляются основными условиями дальнейшего прогресса в нашем знании о глобальном потеплении и возможных путях эволюции климата в будущем.

Глава 6

Шестая глава посвящена выработке сценария долговременной эволюции солнечной активности в будущем. Прогноз среднего уровня солнечной активности в первой половине XXI века (ближайшие 40-50 лет) был произведён с использованием палеоастрофизической информации об активности Солнца на протяжении более 10 000 последних лет и при помощи аналогового метода нелинейного предсказания. Результаты прогноза, произведённого в разделе 6.1, приведены на рисунке 5.

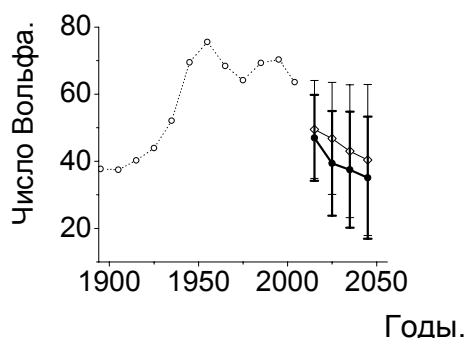


Рисунок 5. Прогноз среднедекадного числа групп солнечных пятен произведённый с использованием реконструкций активности Солнца сделанных в работе Solanki et al. (2004) - жирная линия и в данной диссертации - тонкая линия с пустыми квадратами.

Получилось, что с точки зрения солнечной палеоастрофизики, в 2015-2045 гг. средний уровень СА будет не выше среднего уровня второй половины XX века с вероятностью более 0.999. С другой стороны вероятность того, что среднее число Вольфа в первой половине текущего столетия будет низкой (менее 38 – переход к глубокому минимуму) оказалась небольшой – 0.1. Полученный результат указывает на то, что использование информации, предоставляемой солнечной палеоастрофизикой, открывает пути для долгосрочного прогнозирования активности Солнца, ранее считавшегося невозможным.

Кроме того, в разделе 6.2, произведён прогноз среднего и максимального числа групп солнечных пятен в наступающем 24-м солнечном цикле с использованием палеоастрофизической информации об активности Солнца на протяжении более 10 000 последних лет. Были применены методы линейного и нелинейного предсказания. Показано, что, согласно палеоастрофизическим данным, следующий цикл будет средним – число групп пятен в максимуме достигнет 68-101. Вероятность мощного (число групп пятен более 160) 24-го цикла, предсказываемого некоторыми авторами, незначительна - не более 0.02.

Заключение.

В заключении подведён итог проделанной работы. Основные успехи, достигнутые в преодолении наиболее серьёзных изъянов гелиогеофизики, суммированы в Таблице 1. Как

видно из Таблицы 1, проведённая работа позволила значительно улучшить качество солнечно-климатических исследований и принесла новые серьёзные свидетельства реальности связи СА с климатом Земли. Тем не менее, таких доказательств влияния солнечно-космических факторов на климат, которые могли бы считаться неопровержимыми найдено не было.

Таблица 1.

Наиболее существенные недостатки солнечно-климатических исследований	Улучшение ситуации в результате исследований, проведённых в данной диссертации
Связи между солнечной активностью и явлениями погоды и климата исследуются, в большинстве случаев, без должной строгости.	Разработаны методы оценки значимости линейной корреляции между различными временными рядами в разных частотных диапазонах. Данные методы, базирующиеся на численных монте-карловских экспериментах, позволяют оценивать возможность наличия и характер линейной связи между анализируемыми временными рядами в терминах статистической значимости. Начаты исследования по выявлению нелинейной связи между природными временными сериями
Упомянутые во многих работах солнечно-климатические связи оказываются неустойчивыми во времени и пространстве – то появляются, то исчезают, меняются знаки корреляций и т. д. Вследствие этого, никаких реальных оснований говорить о причинных связях между СА и климатом нет.	Показано, что воздействие на атмосферу космических лучей – потенциального силового воздействующего фактора связи солнце-климат – может происходить весьма сложным и нелинейным способом. Оно может быть опосредовано множеством естественно-природных и антропогенных факторов, вносящих значительные коррективы в отклик климата на вариации СА. Кроме этого, в климате Земли присутствуют естественные циклы земного происхождения с периодами близкими к солнечным. Они способны интерферировать с климатическими циклами солнечной природы и исказить их временной ход. Поэтому пространственно-временная нестабильность и неустойчивость солнечно-климатических корреляций вряд ли сама по себе может считаться серьёзным аргументом против наличия причинных связей между СА и климатом.
Механизм предполагаемого воздействия солнечной активности на тропосферу неизвестен.	Показано, что усиления аэрозольных слоёв в стратосфере после мощных солнечных протонных событий регистрировавшиеся при помощи лидаров и спутниковой аппаратуры в последние 25 лет, неоднократно имели место и в прошлом начиная, по крайней мере, с 1789 года. Это позволяет расширить временной интервал действия данного эффекта, обеспечивающего передачу влияния СА на атмосферу Земли, до более 200 лет и практически доказывает факт существования атмосферно-оптического механизма солнечно-погодной связи. Показано, что атмосферно-оптический механизм солнечно-климатического взаимодействия, разработанный на основе анализа коротких (от нескольких суток до 10-15 лет) экспериментальных временных серий, пригоден и для объяснения солнечно-климатических связей на значительно более длительных (сотни лет) временных масштабах. Это является ещё одним свидетельством реальности указанного механизма.
Прогноз СА на сроки, интересные с точки зрения климатологии, невозможен.	Показано, что использование информации, предоставляемой солнечной палеоастрофизикой, открывает конструктивные возможности для долгосрочного прогнозирования активности Солнца, ранее считавшегося невозможным. Разработан сценарий развития среднего уровня солнечной активности в первой половине XXI века. Проверка точности данного сценария станет возможной после достижения максимума 24-го солнечного цикла, т.е. уже в 2011-2014 гг.

Среди возможных причин неудачи, которой завершился поиск таких доказательств, проведённый с использованием палеоданных, можно предположить следующие:

1) Реального воздействия солнечной активности на земные погоду и климат не существует.

2) Реальная связь Солнце-климат существует, но выявить её при помощи палеореконокструкций не удалось вследствие их низкого качества.

3) Реальная связь Солнце-климат существует, но выявить её не удалось вследствие нелинейного и сложного характера.

Первая из перечисленных причин представляется хотя и не исключённой полностью, но наименее вероятной. Действительно, хотя анализ предполагаемого солнечно-климатического взаимодействия, проведённый на недоступных ранее длинных и сверхдлинных (столетия и более) временных масштабах, так и не дал стопроцентных доказательств наличия подобной связи, сколько либо серьёзных свидетельств её отсутствия тем более не было получено. Наоборот были найдены новые подтверждения реальности влияния солнечно-космических факторов на климат, хотя и не безусловные. Также было показано, что, по крайней мере, некоторые из предполагаемых механизмов солнечного воздействия на погодные и климатические процессы, разработанные путём анализа вариаций гелиогеофизических параметров на коротких временных шкалах, оказываются пригодными и для объяснения значительно более долговременных климатических эффектов. В общем и целом, в результате проведённой работы число свидетельств в пользу того, что солнечная активность влияет на климат заметно увеличилось. Хотя этот рост количества пока не перешёл в качество не приходится сомневаться в том, что дальнейший поиск физически обусловленных связей между активностью Солнца и земным климатом по-прежнему является одним из наиболее перспективных направлений гелиогеофизики и нисколько не утратил актуальности.

Что касается второй возможной причины, то она выглядит более реальной. Как показано в диссертации качество современных палеоклиматических и палеоастрофизических реконструкций пока далеко от идеального. Солнечные палеореконокструкции содержат лишь качественную (не количественную) информацию о прошлом активности нашего светила, причём первоначальный энтузиазм в отношении радиоуглерода как палеоиндикатора активности Солнца оказался несколько преувеличенным. Ещё хуже обстоят дела с прошлым климата Земли. Если в отношении солнечной активности, по крайней мере, наличие долговременных экстремальных эпизодов (минимумы Маундера и Шпёрера, средневековый максимум и т.д.) установлено достаточно надёжно то в климатологии даже существование таких глобальных экстремумов как малый ледниковый период и средневековое потепление до сих пор является предметом дискуссий. В целом, несмотря на значительные успехи, достигнутые в последнее время, методы и подходы палеоклиматологии пока ещё оставляют значительный простор субъективизму. Наименее достоверной представляется палеоклиматологическая информация о вариациях температуры с периодами более ста лет.

Свидетельства того, что солнечно-климатическая связь, даже если реально существует, может осуществляться непрямым и нелинейным путём, причём солнечно-обусловленные вариации климата могут дополнительно искажаться естественными колебаниями не связанными с активностью Солнца (третья из возможных причин), также были получены в данной диссертации. В результате проведённой работы можно заключить, что поиск и выявление связей активности Солнца с погодой и климатом оказалось значительно более сложной задачей, чем предполагалось ранее. Среди основных направлений дальнейшей работы в указанном направлении можно выделить следующие:

1) Дальнейший сбор и накопление информации. Это касается как инструментального мониторинга солнечных, космофизических и метеорологических параметров, так и получения новых палеореконокструкций солнечной активности и климата. Чем большее количество сведений, добытых с использованием различных источников, окажется в нашем распоряжении тем более эффективным может оказаться их совместный анализ. Очевидно, что развитие методов палеоастрофизики и палеоклиматологии является важной частью реализации данного

пункта.

2) Дальнейшее усовершенствование методов статистического анализа, в первую очередь, методов нацеленных на выявление нелинейных эффектов, поиск и обнаружение сложных и нелинейных взаимосвязей между временными рядами.

3) Дальнейшее усовершенствование методов формализации имеющихся неопределённостей с целью их преобразования в точные статистические вероятности.

Можно добавить, что прогресс в области солнечной и солнечно-земной физики, климатического моделирования, физики атмосферы и целом ряде смежных научных дисциплин также был бы весьма желателен для решения поставленных задач.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Friis-Christensen, E., Lassen, K.: 1991. Length of solar cycle: an indicator of solar activity closely associated with climate. *Science*. V. 254, P. 698-700.
- 2) Hoyt D., Schatten K. H.: 1998. Group sunspot numbers: a new solar activity reconstruction. *Solar Physics*. V. 179, P. 189-219.
- 3) Shumilov O.I., Kasatkina E.A., Henriksen K., Vashenyuk E.V.: 1996. Enhancement of stratospheric aerosol after solar proton event. *Annales Geophys.* V. 4, № 11, P. 1119-1123.
- 4) Пудовкин М.И., Распопов О.М.: 1992. Механизм воздействия солнечной активности на состояние нижней атмосферы и метеопараметры. *Геомагнетизм и аэронавигация*. Т.32, №5, С.1-10.
- 5) Распопов О.М., Шумилов О.И., Касаткина Е.А.: 1998. Космические лучи как главный фактор влияния солнечной вариабельности на климатические параметры. *Биофизика*. Т.43, №5, С. 902-908.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.

- 1) Васильев С.С., Огурцов М.Г.: 1994. Вариации потоков солнечных нейтрино: сравнительный анализ периодограмм данных хлор-аргонового эксперимента и относительных чисел солнечных пятен. *Письма в Астрономический Журнал*, Т. 21, №7, С. 553
- 2) Васильев С.С., Кочаров Г.Е., Огурцов М.Г.: 1997, Спектрально-временной анализ данных по концентрации космогенных изотопов за период 1510-1930. *Известия РАН (Сер. Физ.)*. Т. 61, № 6, С. 1224.
- 3) Kocharov G.E., Ogurtsov M.G., Dreschhoff G.A.M.: 1999. On the quasi five year variation of nitrate abundance in polar ice and solar flare activity in the past. *Solar physics*. V. 188, №1, P. 187-190.
- 4) Кочаров Г.Е., Огурцов М.Г.: 1999, Генерация солнечных протонов за последние 415 лет по данным о концентрации нитратов в полярном льду. *Известия РАН (Сер. Физ.)*. Т. 63, №. 8, С. 119-120.
- 5) Наговицын Ю.А., Огурцов М.Г.: 2000, 11-летний солнечный цикл и космогенные архивы. *Известия ГАО*, № 215, С. 271-282.
- 6) Кочаров Г.Е., Кудрявцев И.В., Огурцов М.Г., Соннинен Э., Юнгнер Х.: 2000, Содержание нитратов в гренландском льду и солнечная активность, *Астрономический Журнал*. Т 77, № 12, С. 934-939
- 7) Кочаров Г.Е., Кудрявцев И.В., Огурцов М.Г., Юнгнер Х., Соннинен Э.: 2001, Об изменении величины коронального магнитного поля Солнца за последние 100 лет). *Известия РАН (Сер. Физ.)*. Т. 65, № 3, С. 462-464
- 8) Ogurtsov M.G., Kocharov G.E., Lindholm M., Eronen M., Nagovitsyn Yu.A.: 2001. Solar activity and regional climate. *Radiocarbon*. V. 43, № 2a, P. 439-447.
- 9) Kocharov, G.E., Damon, P., Jungner, H., Koudriavtsev, I., Ogurtsov, M.: 2001. Nuclear paleoastrophysics: prospects and perspectives. *NATO Science Series II. Mathematics, Physics*,

and Chemistry. V. 44, P. 331-343.

- 10) Ogurtsov M.G., Kocharov G.E., Lindholm M., Meriläinen J., Eronen M., Nagovitsyn Yu.A.: 2002. Evidence of solar variation in tree-ring-based climate reconstructions. *Solar Physics*. V. 205, № 2, P. 403-417.
- 11) Ogurtsov M.G., Nagovitsyn Yu.A., Kocharov G.E., Jungner H.: 2002. Long-period cycles of Sun's activity recorded in direct solar data and proxies. *Solar Physics*. V. 211, № 1, P. 371-394.
- 12) Огурцов М.Г., Кочаров Г.Е., Наговицын Ю.А.: 2003. К вопросу о солнечной цикличности в эпоху Маундеровского минимума. *Астрономический Журнал*. Т. 80, № 6, С. 563-570.
- 13) Kocharov G.E., Ogurtsov M.G., Tsereteli Z.L.: 2003. Cosmogenic radiocarbon as a means of studying solar activity in the past. *Astronomy Reports*. V. 47, № 12, P. 1054-1062.
- 14) Ogurtsov M.G., Jungner H., Kocharov G.E., Lindholm M., Eronen M., Nagovitsyn Yu.A.: 2003. On the link between northern Fennoscandian climate and length of quasi eleven-year cycle in galactic cosmic-ray flux. *Solar Physics*. V. 218, № 1, P. 345-357.
- 15) Koudriavtsev I.V., Kocharov G.E., Ogurtsov M.G., Jungner H.: 2003. Long-term modulation of galactic cosmic rays in the heliosphere by curvature of the interplanetary magnetic field. *Solar Physics*. V. 215, P. 385-394.
- 16) Ogurtsov M.G.: 2004. New evidence for long-term persistence in the Sun's activity. *Solar Physics*. V. 220, № 1, P. 93-105.
- 17) Helama S., Holopainen Ya., Timonen M., Ogurtsov M.G., Lindholm M., Meriläinen J., Eronen M.: 2004. Comparison of living-tree and subfossil ring-widths summer temperatures the 18th, 19th and 20th centuries in Northern Finland. *Dendrochronologia*. V. 21, № 3, P. 147-154.
- 18) Ogurtsov M.G., Jungner H., Kocharov G.E., Lindholm M., Eronen M.: 2004. Nitrate concentration in Greenland ice: an indicator of changes in fluxes of solar and galactic high-energy particles. *Solar Physics*. V. 222, P. 177-190.
- 19) Mordvinov A.V., Makarenko N.G., Ogurtsov M.G., Jungner H.: 2004. Reconstruction of magnetic activity of the Sun and changes in its irradiance on a millennium timescale using neurocomputing. *Solar Physics*. V. 224, P. 247-253.
- 20) Ogurtsov M.G., Lindholm M., Eronen M., Helama S.: 2005. Centennial-to-millennial fluctuations in July temperatures in North Finland as recorded by timberline tree-rings of Scots pine. *Quaternary Research*. V. 63, № 2, P. 182-188.
- 21) Огурцов М.Г.: 2005. Современные достижения солнечной палеоастрофизики и проблемы долговременного прогноза активности Солнца. *Астрономический Журнал*. Т. 82, № 6, С. 555-560.
- 22) Ogurtsov M.G.: 2005. On the possibility of forecasting the Sun's activity using radiocarbon solar proxy, *Solar Physics*. V. 231, № 1-2, P.167-176.
- 23) Огурцов М.Г.: 2006, О возможной связи между 2400-летним климатическим ритмом и узловой прецессией кометно-метеороидного комплекса Таврид. *Известия ГАО*. № 218, С. 289-299.
- 24) Ogurtsov M.G., Lindholm M.: 2006. Uncertainties in assessing global warming during the 20th century: disagreement between key data sources. *Energy and Environment*. V. 17, № 5, P. 685-706.
- 25) Дергачёв В.А., Картавых Ю.Ю., Огурцов М.Г., Распопов О.М.: 2007. Дендроиндикация воздействия солнечной активности на климат в последнем тысячелетии. *Известия РАН, (Сер. Геогр.)*. №3, С. 107-114
- 26) Огурцов М.Г.: 2007. О возможном вкладе солнечно-космических факторов в глобальное потепление XX века. *Известия РАН (Сер. Физ.)*. Т. 71, №7, С. 1047-1048.
- 27) Огурцов М.Г.: 2007. Вековая вариация в аэрозольной прозрачности атмосферы как возможное звено связывающее долговременные изменения солнечной активности и климата. *Геомагнетизм и Аэрономия*. Т. 47, № 1, С.126-137.
- 28) Огурцов М.Г.: 2007. Космогенные изотопы и их роль в современной палеоастрофизике Солнца. *Геомагнетизм и Аэрономия*. Т. 47, № 1, С. 90-98.
- 29) Ogurtsov M.G., Jungner H., Lindholm M.: 2007. A potential century-scale rhythm in six major

- paleoclimatic records in the Northern Hemisphere. *Geografiska Annaler*. V. 89A, № 2, P. 129-137.
- 30) Огурцов М.Г.: 2007. Была ли активность Солнца в последние 100 лет аномально высокой – к вопросу о качестве современных солнечных палеорекоkonструкций. *Письма в Астрономический Журнал*. Т. 33, №6, С. 472-480.
 - 31) Raspopov O.M., Dergachev V.A., Kuzmin A. et al.: 2007. Regional features of the Earth's atmosphere climatic response to long-term solar activity variations. *Advances in Space Research*. V. 40, P. 1167-1172.
 - 32) Raspopov O.M., Dergachev V.A., Esper J., Kozyreva O.V., Frank D., Ogurtsov M., Kolstrom T., Shao X.: 2008. The influence of the de Vries (~200-year) solar cycle on climate variations: results from the Central Asian Mountains and their global link. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. V. 259, P. 6 –16.
 - 33) Ogurtsov M.G., Raspopov O.M., Helama S., Oinonen M., Lindholm M., Jungner H., Meriläinen J.: 2008. Climatic variability along a North-South transect of Finland over the last 500 years: signature of solar influence or internal climate oscillations? *Geografiska Annaler*. V.90A, №2, P.141-150.
 - 34) Огурцов М.Г.: 2009. Прогноз 24-го цикла солнечной активности на основе информации о солнечной активности за последние 10000 лет. *Геомагнетизм и Аэрономия*. Т. 49, № 3, С. 427-430.
 - 35) Helama S., Timonen M., Holopainen J., Ogurtsov M.G., Melikäinen K., Eronen M., Lindholm M., Meriläinen J.: 2009. Summer temperature variations in Lapland during the Medieval Warm Period and the Little Ice Age relative to natural instability of thermohaline circulation on multi-decadal and multi-centennial scales. *Journal of Quaternary Science*. V. 24, № 5, P. 450–456.
 - 36) Ogurtsov M.G., Jungner H., Lindholm M., Helama S., Dergachev V.A.: 2009. Quasiseccular cyclicity in the climate of the Earth's Northern hemisphere and its possible relation to solar activity variations. *Geomagnetism and Aeronomy*. V.49, №7, P. 234-240.