

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

523.746

**ИСТОРИЯ ОБ ИСЧЕЗНУВШИХ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТНАХ\*)***Дж. Эдди*

*Согласно старым наблюдениям между 1645 и 1715 гг. пятен на Солнце практически не было. По-видимому, активность Солнца сильно меняется, и мы живем в период необычно высокой его активности.*

В 1893 г. директор королевской Гринвичской обсерватории в Лондоне Э. У. Маундер, проглядывая старые книги и журналы, с трудом поверил тому, что он там обнаружил. По-видимому, в течение многих лет астрономы не осознавали того весьма существенного факта, что поведение Солнца вопреки общепринятому мнению не является регулярным и предсказуемым. Если верить данным, которые обнаружил Маундер, Солнце существенно изменилось в совсем недавние времена. В частности, согласно старым данным, закончившийся в 1715 г. и продолжавшийся 70 лет период характеризовался почти полным отсутствием солнечных пятен и других форм солнечной активности. Маундер понимал, какое огромное значение имеют эти данные (если они правильны) не только для астрономии, но, возможно, также и для климата, а следовательно, и для будущих условий жизни на Земле.

Солнечные пятна — весьма известное явление на Солнце, и наличие цикла продолжительностью в 11 лет, за время которого эти пятна появляются и исчезают, — один из наиболее твердо установленных фактов в астрономии. Хотя в течение столетий астрономы Востока отмечали наличие на Солнце больших пятен, которые они наблюдали невооруженным глазом, Запад в основном игнорировал эти факты. Отношение резко изменилось после того, как в 1611 г. их увидел в телескоп Галилей и другие. С тех пор и до настоящего времени ведутся непрерывные телескопические наблюдения солнечных пятен. В 1843 г. немецкий астроном-любитель Г. Швабе на основе своих собственных наблюдений отметил, что на графике среднего числа пятен, видимых за год, четко проявляется цикличность продолжительностью около 10 лет. Это открытие удивило астрономов-профессионалов, которые в течение длительного времени полагали, что нет никакой цикличности ни в появлении пятен, ни для других видов солнечной активности. Однако вскоре после сообщения Швабе другие астрономы подтвердили наличие цикла и уточнили его продолжительность, равную 11,2 года. На основании данных старых наблюдений швейцарский

\*) John A. E d d y, The Case of the Missing Sunspots, Scientific American 236 (5), 80—88 (May 1977). Перевод Н. И. Гинзбург.

Джон А. Эдди, занимающийся астрономией Солнца, — сотрудник Астрофизического центра Гарвардского колледжа и Смитсоновской астрофизической обсерватории, США.

астроном Р. Вольф установил, что цикличность заметна, по крайней мере начиная с 1700 г.; более старые данные не казались Вольфу достаточно надежными. К 1893 г. было хорошо известно, что цикл солнечных пятен связан как с другими проявлениями солнечной активности, так и с повторяющимися земными эффектами, такими как полярные сияния. Кривая числа солнечных пятен за год, начиная с 1700 г., имела вид волны, расходящейся без изменений в обе стороны по времени. Мало кто сомневался

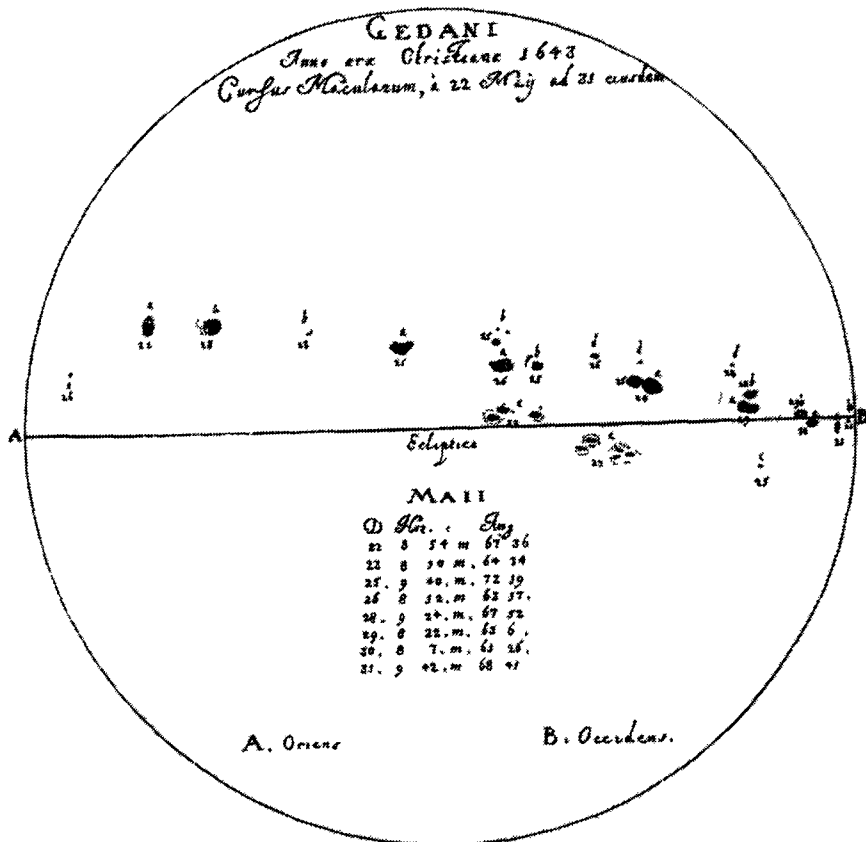


Рис. 1. Рисунок солнечных пятен, опубликованный И. Гевелиусом из Данцига в его книге «Selenographia» (1647 г.).

На рисунке видно перемещение нескольких групп пятен на вращающейся поверхности Солнца с 22 мая до 31 мая 1643 г. Из ряда таких рисунков автор и его сотрудники получили скорость вращения Солнца в середине XVII века, как раз в начале 70-летнего периода с почти полным отсутствием пятен. Форма пятен и детали их темных ядер, окруженных более светлыми тенями, говорят о том, что качество телескопов в XVII веке было достаточно высоким и что астрономы тех лет видели те же детали солнечных пятен, что и наши современники.

в том, что солнечные пятна и 11-летний цикл — вечные свойства Солнца. Тогда, как и теперь, эти свойства воспринимали как доказательство регулярности солнечной активности, что в свою очередь означало постоянство и предсказуемость свойств Солнца.

В 1893 г. Солнце находилось в максимуме цикла, и на нем видны были сотни пятен, о чем Маундер хорошо знал. Даже в годы минимума солнечной активности на Солнце обычно находят несколько пятен; редок тот месяц, в течение которого на Солнце не появляется никаких пятен.

И все же в покрытых плесенью записях XVII века (т. е. в записях, сделанных во времена как раз перед началом знакомой кривой солнечных пятен) Маундер обнаружил, что тогда год за годом на Солнце не появлялось никаких пятен. За 32 года в северном полушарии Солнца не видели ни одного пятна. За 65 лет ни разу не удалось наблюдать одновременно более одной маленькой группы солнечных пятен. Было несколько десятилетних периодов, когда на всем Солнце никому не удалось увидеть ни одного пятна. Маундер обнаружил, что полное число солнечных пятен, зафиксированных между 1645 и 1715 гг., было меньше количества солнечных пятен, видимых за один «средний» год в наши дни.

В 1894 г. Маундер опубликовал статью под названием «Продолжительный минимум солнечных пятен», в которой подробно описал этот странный период в истории Солнца и призвал обратить внимание на его возможное значение. Если отсутствие пятен соответствовало действительности, это могло пошатнуть основы солнечной астрономии. Маундер отметил, что такой необычный период может послужить мощным средством выяснения связи между Землей и Солнцем: если обычные максимумы и минимумы 11-летнего цикла можно связать с изменениями магнитного поля Земли или, может быть, с изменениями погоды, то продолжительные изменения в поведении Солнца могут сопровождаться и более существенными эффектами на Земле.

Неизвестно, прислушался ли кто-либо к словам Маундера. Не обратили особого внимания и на предыдущую его статью на ту же тему, написанную в 1890 г., а также и на опубликованную годом ранее статью немецкого астронома Г. Шперера, который первый привлек внимание Маундера к периоду с глубоким минимумом солнечной активности. Но Маундер не сдавался. В 1922 г. он снова опубликовал статью под тем же названием «Продолжительный минимум солнечных пятен», вновь подчеркивая важность существования этого 70-летнего периода для солнечной астрономии и для физики Земли. Шесть лет спустя Маундер умер, и, как бы дразня его, цикл солнечных пятен повторялся снова и снова. Статьи Маундера были либо забыты, либо приписаны энтузиасту, слепо верившему старым поверхностным записям. Несколько лет тому назад мне показалось, что настало время выяснить вопрос об исчезнувших солнечных пятнах, который слишком долго является «семейной тайной» физики Солнца. Меня начали раздражать ссылки на этот период, появляющиеся время от времени в связи с соответствующими изменениями климата на Земле. Будучи астрономом, изучающим Солнце, я был уверен, что такого минимума существовать не могло, а мой интерес к истории сделал увлекательной задачу «перекрестного допроса» Маундера.

Возникшая задача напоминала детективный роман: было сообщение, что в далеком прошлом совершено «преступление», серьезное для астрономии, а возможно, и для самой Земли. Имело ли оно место? Найденным Маундером «улика» теперь уже более 250 лет, но их все еще можно разыскать в библиотеках, хранящих журналы XVII и XVIII веков. Еще более обнадеживающим явилось то обстоятельство, что полвека спустя после смерти Маундера появились на свет новые свидетельства. Речь идет об исторических каталогах наблюдений полярных сияний, о произведенных на Востоке невооруженным глазом наблюдениях солнечных пятен, а также о лучшем понимании того, как совершенно неактивное Солнце может выглядеть во время полных солнечных затмений. Но лучшим из оказавшихся в моем распоряжении доказательств явился современный анализ годичных колец древесных стволов. Важной для нашей цели была не ширина колец, которая связана лишь с микроклиматом, а их химический состав, содержащий косвенные данные об изменениях на Солнце.

Ни одна из этих «улик» не была известна Маундеру. Но и ни одна из них не являлась решающей. Однако их совокупность совместно с оригинальными историческими записями могла бы, быть может, решить этот запутанный вопрос.

Изучая астрономические записи этого периода, я к своему удивлению обнаружил, что они в точности отражены Маундером: в связи с этим я начал называть период глубокого минимума солнечных пятен «минимумом Маундера». Когда в 1671 г. (в середине минимума Маундера) появилось

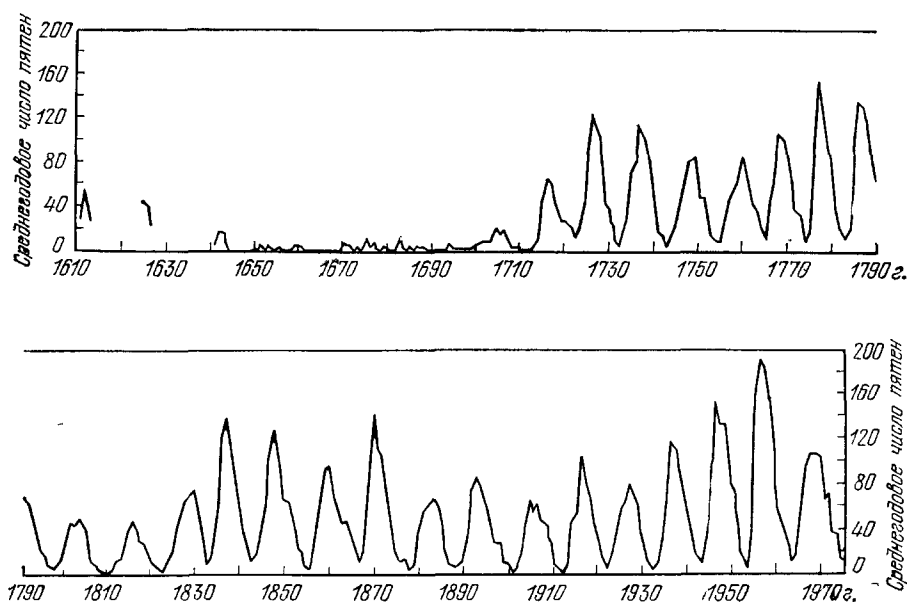


Рис. 2. Среднегодовое число пятен — мера количества пятен, видимых на поверхности Солнца с 1610 по 1976 гг. включительно.

Видно, что цикл солнечных пятен не является регулярным ни по частоте, ни по амплитуде. Интервал между соседними максимумами цикла не всегда равен 11 годам; иногда он укорачивается до 8 лет, а иногда достигает 17. Кроме того, некоторые максимумы, такие, как максимум 1959 г., много выше других, например, слабых максимумов в начале XIX века. Период между 1645 и 1715 гг. автор назвал минимумом Маундера по имени английского исследователя Солнца Э. В. Маундера, который первым отметил возможное значение этого периода для условий на Земле. Данные о солнечных пятнах, наблюдаемых до 1650 г., весьма скудные. Первый изолированный пик в районе 1612 г. (слева) получен из наблюдений Галилея; второй пик получен по данным наблюдений Х. Шайнера, приведенных в его книге «Rosa Ursina»; третий пик — данные наблюдений И. Гевеллуса.

сообщение о новом пятне на Солнце, редактор журнала «Philosophical Transaction of the Royal Society of London» писал: «В Париже сиятельный синьор Кассини недавно снова обнаружил Пятна на Солнце, ни одно из которых не было замечено в течение многих лет».

Затем для удобства читателей редактор описывает предыдущее пятно, замеченное на Солнце 11 годами ранее. Сам Кассини (Г. Д. Кассини — основатель и первый директор Парижской обсерватории) писал по этому поводу: «Прошло почти 20 лет с тех пор как астрономы видели сколь-либо значительные солнечные пятна, хотя ранее, вскоре после изобретения телескопа, их время от времени наблюдали». Можно ли было так писать в условиях обычного для нас поведения Солнца?

Дж. Флемстид — первый королевский астроном Англии и первый директор Королевской Гринвичской обсерватории — наблюдал Солнце семь лет, прежде чем смог заметить одно пятно. В книгах, написанных значительно позже, часто ссылаются на этот, почти лишенный солнечных

пятен период. Существенно то, что ссылки на период глубокого минимума солнечных пятен XVII века начали исчезать из литературы только после открытия Швабе 11-летнего цикла. Сохранившиеся в памяти астрономов воспоминания о глубоком минимуме солнечных пятен могут объяснить удивление, с которым они встретили сообщение Швабе о наличии цикличности. Подавлением и временным прекращением цикла солнечных пятен можно объяснить, почему прошло более 230 лет после первых телескопических наблюдений солнечных пятен до запоздавшего открытия четко выраженной цикличности их появления.

Но можно ли доверять наблюдателям, работавшим в столь давние времена? Сколь хороши были их телескопы? Достаточно ли тщательно наблюдали они за солнечными пятнами. В XVII веке, во времена Людовика XIV, люди носили причудливые одежды, писали тяжеловесным слогом. Однако именно в этот период Кассини открыл большую темную полосу в кольцах Сатурна, и было обнаружено по крайней мере пять его спутников. Минимум Маундера начался через 35 лет после того, как Галилей создал свой первый маленький телескоп. Этот промежуток времени был ознаменован быстрым расцветом оптики и астрономии. XVII век — время подвесных телескопов с фокусным расстоянием до 200 футов. Это было время первого зеркального телескопа Ньютона и многих других новшеств. Астрономы наблюдали и считали солнечные пятна почти так же, как это делается в наши дни, а их инструменты мало отличались от применяемых для этой же цели в течение последующих двух веков. Их рисунки солнечных пятен, приводимые в журналах и книгах, вряд ли уступают снимкам наблюдателей 1977 г. Я убежден, что астрономы эпохи Людовика XIV обладали как надежными инструментами, так и способностью видеть все солнечные пятна (кроме самых мельчайших), если таковые существовали тогда на Солнце. Я верю, что наблюдатели в то время были во всех отношениях столь же умелыми, как мы, и что они скорей всего имели те же стимулы и профессиональные интересы и, возможно, могли проводить у телескопов больше времени.

Вели ли они непрерывные наблюдения за Солнцем? Не может ли быть, что Маундер принял отсутствие доказательств за доказательство отсутствия? Два факта убеждают меня в том, что дело не в недостатке доказательств. В тот период неоднократно отмечали отсутствие солнечных пятен, и, если согласиться с точкой зрения, что астрономов XVII века

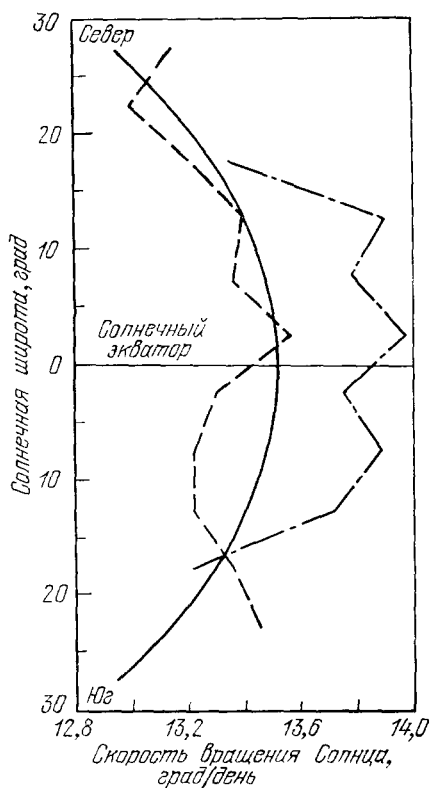


Рис. 3. Увеличение скорости вращения Солнца на экваторе как раз перед началом минимума Маундера.

Солнце не вращается как твердое тело; экваториальные его области вращаются быстрее, чем области с большей широтой. На рисунке приведена современная скорость вращения Солнца на разных широтах в градусах за день (сплошная кривая). Из данных Шайнера (штриховая кривая) следует, что скорость вращения Солнца в 1620 г. мало отличалась от современной. Однако из проведенных в 1640 г. наблюдений Гевелиуса (штрих-пунктирная кривая) видно, что отношение вращения экваториальных областей Солнца к полярным возросло в три раза. Неясно, является ли этот эффект причиной или следствием минимума Маундера.

работа вдохновляла так же, как и нас, можно думать, что поиски солнечных пятен проводились особенно тщательно с целью выяснения причин странного явления. Более того, как ясно из журналов того времени, факт обнаружения нового солнечного пятна являлся достаточной причиной для сообщения в печати. В наши дни, даже в период минимума солнечной активности, на Солнце видно столь много пятен, что ни один журнал не мог бы опубликовать статей о каждом из них.

□

Могла ли погода помешать наблюдениям? Могло ли так случиться, что в Европе в течение 70 лет было необычайно много дней со сплошной облачностью, мешающей телескопическим наблюдениям? В те времена

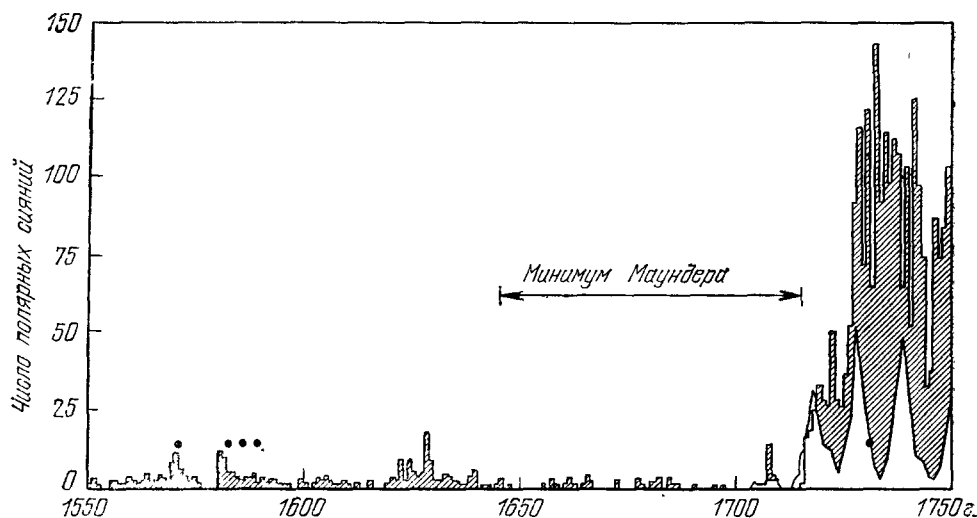


Рис. 4. Число ежегодно наблюдаемых полярных сияний от 1550 до 1750 г. (заштрихованные пики).

«Северные сияния», число которых связано с уровнем солнечной активности, почти исчезают в период минимума Маундара. В начале XVIII века, когда, по-видимому, начался современный цикл солнечных пятен (не заштриховано), число зарегистрированных полярных сияний возросло в 20 раз. Периоды с наибольшим числом полярных сияний также соответствует времени, когда на Востоке солнечные пятна наблюдали невооруженным глазом (кружки).

в Европе действительно царил необычный холод, но сплошной повсеместной облачности не было. В противном случае мы узнали бы об этом из статей астрономов, которые отнюдь не страдали от бездействия. Более того, в XVII веке велись весьма обширные и активные ночные астрономические наблюдения: регулярно видели кометы, а для полученных в те времена сведений о планетах требовалось не только чистое небо, но и спокойная атмосфера.

Исторические сведения о полярных сияниях — «северных свечениях» — оставляют еще меньше сомнений в том, что минимум Маундера действительно имел место. Полярные сияния и уровень солнечной активности связаны между собой. Количество ночей, когда видны полярные сияния, хорошо коррелирует с числом солнечных пятен. Вообще говоря, частота наблюдений полярных сияний зависит также от расстояния между пунктом наблюдения и магнитным полюсом Земли. Полярные сияния чаще видят на более высоких широтах и реже вблизи экватора, поскольку на низкой широте геометрия магнитных силовых линий земного магнитного поля защищает атмосферу от проникновения идущих от Солнца частиц,

вызывающих свечение. В обычных условиях при нормальной солнечной активности в населенных областях Европы за период в 70 лет наблюдают по крайней мере 500, а возможно, даже до 1000 полярных сияний. Однако между 1645 и 1715 гг. сообщений о наблюдениях полярных сияний в Европе, по-видимому, не было. Даже в Скандинавии северные сияния наблюдали тогда весьма редко и их появление считали необыкновенным событием, хотя в наши дни их видят почти каждую ночь. За период минимума Маундера был один отрезок времени в 37 лет, когда на Земле не было зафиксировано ни одного полярного сияния. И когда, наконец, в марте 1716 г. (в конце минимума Маундера) королевский астроном Э. Хэлли увидел в Англии полярное сияние, он счел нужным опубликовать статью с объяснением этого явления. Он признал, что никогда ранее не видел полярных сияний, хотя постоянно занимался их поисками, а ему было уже 60 лет. Жизнь Хэлли, хотя он и не знал этого, совпала с большей частью минимума Маундера.

Семидесятилетний период минимума солнечных пятен проявляется особенно рельефно при построении графика сообщений о полярных сияниях за разные годы. Маундер смог бы написать свои статьи, располагая лишь одними этими данными. Однако в связи с подсчетом зарегистрированных полярных сияний возникает также другой эффект, который требует объяснений. В древние времена было очень мало сообщений о полярных сияниях по сравнению с их количеством, наблюдаемым в наши дни. Почему же этих сообщений было так мало даже до 1645 г.? Согласно сохранившимся записям число полярных сияний, начавшее резко возрастать примерно с 1550 г., было прервано минимумом Маундера, а затем, после 1716 г., скачкообразно возросло примерно в 20 раз. До какой степени этот резкий рост зафиксированных после 1550 г. полярных сияний был явлением социальным, скажем, отражением возросшего интереса к астрономии в эпоху Возрождения или, в более поздние времена, влиянием статьи Хэлли? Я подозреваю, что в основном рост числа сообщений о полярных сияниях, начиная со средних веков, — явление социальное. Однако другие данные заставляют верить, что, по крайней мере частично, этот рост — явление физическое, т. е. эффект, отражающий изменения на Солнце. Есть основания полагать, что в более далекие времена были и другие длительные периоды, похожие на минимум Маундера. Их легко заметить по ранним сообщениям о полярных сияниях и о количестве видимых тогда невооруженным глазом солнечных пятен. Я пришел к выводу, что частота наблюдений солнечных пятен и полярных сияний в наши дни является необычной и что, начиная с XVII века, активность Солнца постепенно возросла до очень высокого уровня — до уровня, равного которому не было, быть может, в течение последнего тысячелетия.

Сообщения о солнечных пятнах, наблюдавшихся без помощи телескопа, позволяют проверить данные о полярных сияниях и подтвердить реальность существования минимума Маундера. Сообщения о пятнах на Солнце впервые появились по крайней мере еще в V веке до нашей эры и стали с тех пор регулярными, особенно на Востоке. Большие пятна или группы пятен можно легко увидеть невооруженным глазом при восходе или закате Солнца, или через достаточно толстый слой дыма или тумана. В 1933 г. японский астроном С. Канда составил список известных данных о солнечных пятнах, наблюдавшихся невооруженным глазом в Японии, Китае и Корее. Он обнаружил, что с начала нашей эры за столетие наблюдали в среднем от 5 до 10 таких пятен, включая немногочисленные периоды, когда пятна видели чаще, и промежутки времени, когда пятен вообще не было видно. Один из таких промежутков времени, перекрывающий минимум Маундера, продолжался от 1584 до 1770 г.

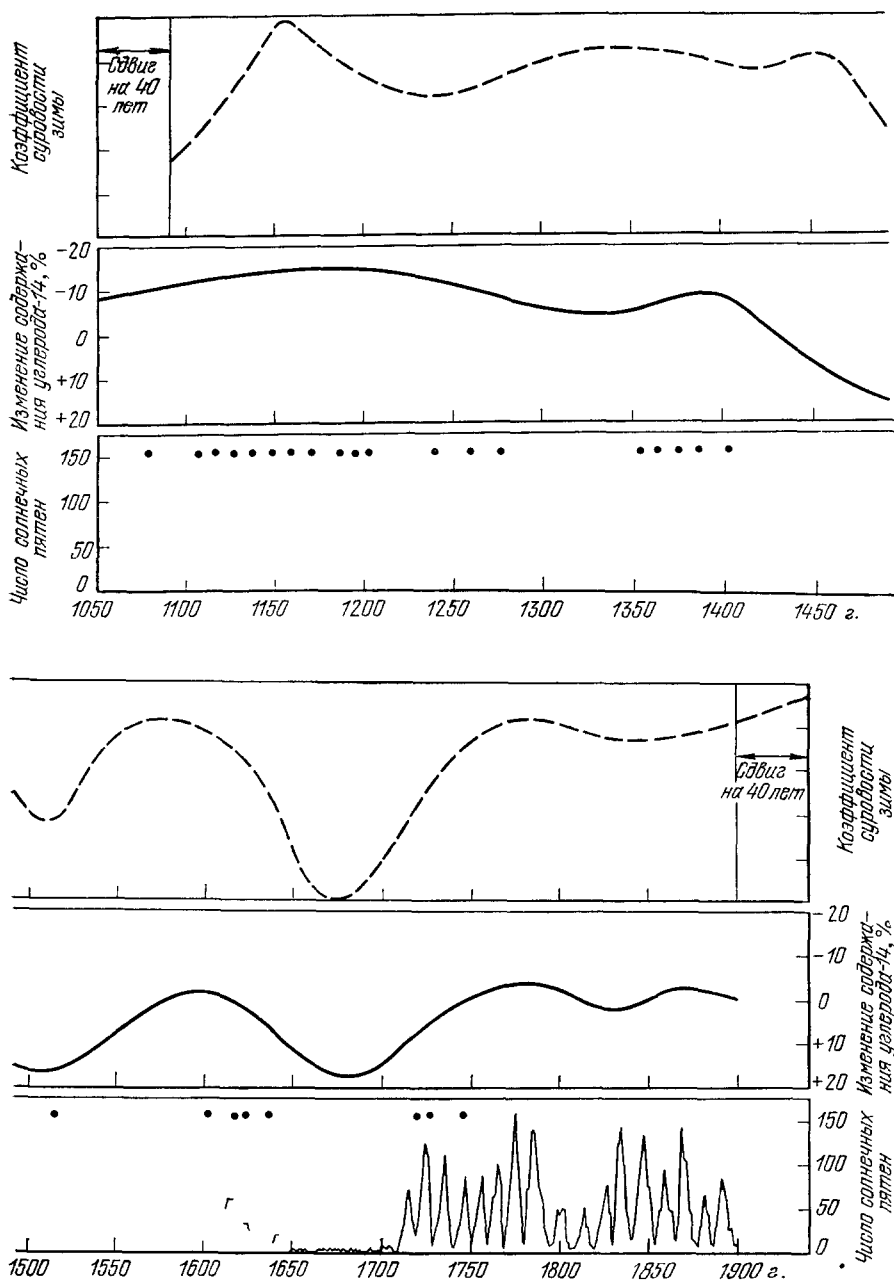


Рис. 5. Изменения климата на Земле совпадают с длительными по времени вариациями солнечной активности.

Приведен цикл солнечных пятен с 1610 по 1950 гг. (сплошная кривая) вместе с данными о наблюдавшихся на Востоке до 1750 г. невооруженным глазом крупных пятнах (кружки). Жирная кривая соответствует относительно процентному содержанию в атмосфере углерода-14, определенному по анализу годичных колец древесных стволов с 1500 до 1900 гг. нашей эры. Отношение процентного содержания углерода-14 к обычному изотопу углерода изменяется с изменением уровня солнечной активности; в атмосфере образуется большее количество углерода-14 при спокойном Солнце и меньшее количество при активном Солнце. Для удобства сравнения с солнечной активностью ордината направлена вниз. Кривая содержания в атмосфере углерода-14 хорошо согласуется с кривой общего числа наблюдаемых солнечных пятен. Пики и впадины на кривой солнечной активности совпадают также с пиками и впадинами на кривой суровости зимы в Париже и Лондоне (штриховая кривая), определенных по историческим данным английского климатолога Х. Лемба. Кривая суровости зимы смещена на графике на 40 лет, чтобы учесть промежуток времени между образованием углерода-14 в верхних слоях атмосферы и попаданием его в стволы деревьев. После примерно 1900 г., когда возросли и солнечная активность, и температура во всем мире, данные об углероде-14 непригодны для отражения солнечной активности; согласие нарушается в связи с эффектом Суэсса — современным вытеснением из атмосферы углерода-14 благодаря сгоранию ископаемого топлива.



Эти сведения сами по себе отрывочны, и, кроме того, наличие таких промежутков времени можно объяснить и социальными эффектами, особенно если принять во внимание весьма малое число наблюдений. Я склонен был бы рассматривать наличие промежутков времени с отсутствием солнечных пятен на Востоке как случайность, если бы не было столь хорошего согласия между количеством сообщений о наблюдениях невооруженным глазом солнечных пятен и частотой зафиксированных в Европе полярных сияний за период, превышающий 2000 лет.

□

Помимо сообщений о полярных сияниях и солнечных пятнах, сведения об уровнях солнечной активности в прошлом дают описания солнечной короны, наблюдаемой во время полных солнечных затмений. Форма короны — разреженной внешней атмосферы Солнца — при большом и малом количестве пятен существенно различна. С солнечными пятнами связаны сильные магнитные поля на поверхности Солнца, и эти магнитные поля определяют форму жемчужно-белых лучей короны, которые видны вокруг Солнца при полном его затмении. При наличии многочисленных пятен, а следовательно, и концентрированных солнечных магнитных полей корона заполнена лучами, обрамляющими Солнце, как лепестки георгина. Когда количество солнечных пятен падает, число корональных лучей уменьшается, как будто кто-то выщипал эти лепестки. При минимуме солнечных пятен во время полного солнечного затмения видна тусклая корона с небольшим количеством лучей вблизи экватора.

Что же должно произойти с короной при полном отсутствии солнечных пятен в течение лет или десятилетий? Наблюдатель должен все же видеть зодиакальный свет, или «фальшивую» корону, обрамляющую черный диск Луны, — узкое кольцо бледно-красного цвета без каких-либо лучей. В отличие от истинной короны, зодиакальный свет не является частью солнечной атмосферы; это просто солнечный свет, рассеиваемый пылью в межпланетном пространстве. Существующий всегда зодиакальный свет во время полного солнечного затмения обычно не виден на фоне более яркой короны.

Между 1645 и 1715 гг. 63 раза имелась возможность наблюдать полное солнечное затмение. Я попытался найти данные о всех наблюдениях, чтобы выяснить, каковы были описания короны во времена минимума Маундера. Большую часть затмений можно было наблюдать только из недоступных мест, а в XVII и XVIII веках, в отличие от наших дней, не было принято посылать экспедиции на край Земли в погоне за лунной тенью. Однако некоторые затмения были видны вблизи европейских обсерваторий, и их наблюдения производились весьма тщательно. Не было пропущено ни одного видимого в Европе затмения, и несколько затмений наблюдали астрономы, оказавшиеся в это время в Новом Свете или в Азии.

Большинство наблюдающих затмение астрономов-профессионалов не смотрели на небо, а тратили драгоценные мгновения на изучение изображения затмения, проектируемого на экран телескопом. На этом изображении они измеряли детали затмения Солнца Луной, которые представляли в то время актуальный интерес. Однако те, кто во время полного солнечного затмения смотрели на небо, все приводят аналогичные описания: вокруг Луны они видели узкое тусклое кольцо постоянной ширины бледно-красного цвета. Ни один из наблюдателей не описал пронизанной белыми лучами короны, которая так знакома и так впечатляет в наши дни. Эти сообщения убеждают меня в том, что во время минимума Маундера лучистая корона или полностью отсутствовала, или была столь тусклой, что можно было увидеть лишь зодиакальный свет.

Похоже на то, что данные о солнечных затмениях могли бы служить четким свидетельством в пользу реальности существования минимума Маундера. Однако, как и в случае полярных сияний, мы должны обсудить также наблюдения, производившиеся в более давние времена. Мне не удалось найти ни одного описания короны со структурой во время затмений в эпоху, предшествующую минимуму Маундера! Полные затмения Солнца привлекали внимание и внушали благоговейный трепет человеку в течение тысячелетий. Как могло случиться, что из тысяч описаний сотен полных солнечных затмений выпало описание этого наиболее прекрасного и волнующего зрелища? Может быть, мы видим только то, что ищем, и не замечаем других даже очень необычных явлений? Ведь до конца XIX века не было известно, что корона является частью Солнца. Быть может, наблюдателей ослепляли последние лучи Солнца перед наступлением полного затмения, и они не замечали легкой «бесплотной» короны. Возможно, до наступления эпохи Просвещения в XVIII веке никто не удосужился описать корону.

Но я думаю, что каждый, кто видел невооруженным глазом захватывающую дыхание красоту короны, понимает, так же как и я, полную беспочвенность всех этих предположений. Представляется вполне возможным, что солнечная корона действительно отсутствовала в течение времени, значительно превышающего длительность минимума Маундера и достигающего, быть может, нескольких сотен лет. Тогда отсутствие короны совпадает с еще более ранним протяженным минимумом солнечной активности, который я назвал минимумом Шперера и который четко виден по подсчету полярных сияний и по отсутствию сообщений о наблюдаемых невооруженным глазом солнечных пятнах, а также по данным, полученным с помощью изучения древесных колец. Все это говорит о том, что корона, которую мы видим сегодня, может оказаться преходящим современным свойством Солнца.

□

Другая независимая «улика», касающаяся минимума Маундера, содержится в работе Д. Е. Троттер, П. А. Гилмана и автора, которые предприняли попытку реконструкции картины вращения Солнца в XVIII веке. Из современных наблюдений следует, что Солнце не вращается, как твердое тело; чем выше широта, тем медленнее вращение, в результате чего экватор Солнца делает оборот за 27 дней, а полярные области за 31 день. Согласно современной теории Солнца наблюдаемое дифференциальное вращение Солнца приводит к образованию цикличности солнечных пятен в результате действия солнечного динамо. Расположенные в глубине Солнца магнитные поля взаимодействуют с дифференциальным вращением его поверхности, что генерирует электротоки, которые и ответственны за существование магнитных полей солнечных пятен. Тогда при возникновении четко выраженной аномалии количества солнечных пятен можно ожидать сопутствующую ей аномалию в поведении или солнечных магнитных полей, или вращения солнечной поверхности.

Вращение Солнца можно измерить весьма точно с помощью серии зарисовок, изображающих последовательно ежедневное расположение солнечных пятен. Солнечные пятна служат индикаторами вращения поверхности, подобно тому, как плавающие на поверхности воды листья указывают на движение потока. Троттер, Гилман и автор восстановили рисунки вращения Солнца в XVII веке, изучая оригинальные рисунки Солнца и солнечных пятен, найденные в двух старых книгах: в «*Rosa Ursina*» Х. Шайнера, опубликованной в 1630 г. до наступления минимума

Маундера, и в «Selenographia» И. Гевелиуса, которая счастливым образом появилась в 1647 г., т. е. в начале этого минимума.

В каждой из книг приведены ежедневные рисунки Солнца за длительный период времени порядка двух лет. Согласно рисункам Шайнера из «Rosa Ursina», сделанным в 1625 и 1627 гг., вращение Солнца мало отличается от современного: вращение замедляется с широтой на ту же величину. На рисунках же Гевелиуса, сделанных за период времени от 1642 до 1644 г. включительно, т. е. до момента исчезновения последнего пятна перед наступлением длительного минимума, видны удивительные и многозначительные изменения. Вращение солнечного экватора ускорилось на целые сутки по сравнению с 1625 г. При этом скорость вращения на экваторе по сравнению с вращением удаленных от него областей увеличилась в три раза. Не поймали ли мы «виновника преступления», установив это изменение картины вращения солнечной поверхности, наступившее как раз в тот момент, когда начали исчезать пятна? Но является ли изменение дифференциального вращения Солнца причиной наступления минимума Маундера или его следствием?



Здесь мои детективные изыскания достигли той стадии, когда почти не осталось сомнений ни в правоте Маундера, ни в справедливости старинных записей. Последняя, причем веская, улика связана с изучением годичных колец древесных стволов.

Радиоактивный изотоп углерод-14 образуется в верхней атмосфере Земли в результате действия галактических космических лучей. Поток этих космических лучей в свою очередь модулируется протяженным магнитным солнечным полем, которое определяется уровнем солнечной активности. Когда Солнце очень активно, его протяженное магнитное поле экранирует Землю от какой-то части галактических космических лучей; меньшее их число достигает верхних слоев атмосферы, и поэтому образуется меньшее количество углерода-14. Когда активность Солнца снижается, его протяженное магнитное поле ослабевает; Земля получает большую дозу космических лучей, и содержание углерода-14 в атмосфере возрастает. Правда, существуют и другие, отличные от солнечного, механизмы, влияющие на образование углерода-14. Тем не менее наличие точных данных о содержании в прошлом углерода-14 в атмосфере характеризует активность Солнца в те времена.

Именно такие данные любезно предоставляют нам деревья, стволы которых удачно разделены на кольца, каждое из которых соответствует одному году. Образующийся в верхних слоях атмосферы углерод-14 в результате фотосинтеза углекислого газа в конце концов оседает в стволах деревьев. Из анализа каждого древесного кольца можно определить в углекислом газе отношение углерода-14 к обычному изотопу углерода. Такие кропотливые анализы ведутся в течение многих лет в целом ряде лабораторий, преимущественно в связи с тем, что определение процентного содержания углерода-14 в прошлом необходимо для археологии и других дисциплин. Некоторые занимающиеся этим вопросом специалисты уже отмечали потенциальную ценность данных об углероде-14 для определения солнечной активности в прошлом.

Еще в 1958 г. голландский исследователь Х. де Вриз обратил внимание на резко выраженную аномалию процентного содержания углерода-14 в кольцах стволов деревьев, соответствующих второй половине XVII и первой части XVIII веков. В те годы процентное содержание углерода-14 резко возросло. Именно этого нужно было бы ожидать при аномально низкой солнечной активности в этот период времени. Эффект

де Вриза был подтвержден данными, полученными в разных частях света. Однако связь этого эффекта с активностью Солнца не была полностью понята, в основном в силу того, что исторические данные о солнечной активности были так мало известны. Теперь же кажется ясным, что резкое изменение количества углерода-14, впервые обнаруженное де Вризом, подтверждает существенным образом наличие минимума Маундера.

□

Таким образом, историческое подтверждение существования минимума Маундера привело к волнующему пересмотру истории Солнца. С помощью анализа древесных колец реликтовых сосен — самых долгоживущих из всех земных растений — получены данные о содержании углерода-14 по крайней мере до 5000 г. до нашей эры. Наиболее характерной особенностью на кривой зависимости процентного содержания углерода-14 от времени за длительный период является медленная модуляция с явным периодом около 10 000 лет. Эта модуляция вызвана изменениями напряженности земного магнитного поля, которое является еще одним экраном на пути галактических космических лучей. На кривой присутствуют и множество других изменений, происходящих за более короткий промежуток времени. Наиболее позднее из них соответствует солнечной аномалии, по-видимому, хорошо установленной прямыми и косвенными историческими данными. Хотя на эту возможную связь указывали и ранее, только теперь стало точно известно, какое именно изменение на Солнце связано с изменением содержания углерода-14. Наконец-то мы можем произвести калибровку данных об углероде-14 в зависимости от изменений на Солнце. Беря за эталон минимум Маундера, мы можем расшифровать теперь столь долго скрытую от нас историю Солнца не только до времен Людовика XIV или Галилея, но значительно дальше — за 7000 лет назад, т. е. до начала Бронзового века. Как иногда происходит при детективных расследованиях, раскрытие одного преступления проливает свет на другое — более крупное и, возможно, более важное.

На кривой содержания углерода-14 за последние 5000 лет видны по крайней мере 12 особенностей, столь же четких, как и минимум Маундера. Каждый из них занимает промежуток времени от 50 до нескольких сотен лет. Некоторые указывают на резкие понижения солнечной активности, подобные минимуму Маундера. Один из них — минимум Шперера — продолжался примерно от 1400 до 1510 г. нашей эры. В этот период было также мало сообщений как о полярных сияниях, так и о видимых невооруженным глазом солнечных пятнах, а также не появилось никаких сообщений о наблюдениях при полном солнечном затмении короны со структурой. Другие значительные изменения имеют противоположное направление и соответствуют поэтому эрам аномально высокой солнечной активности, возможно, даже больше известных в современный период. Одно из этих изменений, которое я назвал средневековым максимумом, приходится на период времени от 1100 до 1300 г. Другое, я полагаю, падает на наши дни, которые характеризуются повышающимся уровнем солнечной активности, следующим за минимумом Маундера, который, может быть, достиг своего пика (а может быть и нет) в 1959 г., когда был зафиксирован наивысший из всех наблюдаемых максимумов солнечных пятен. Во время только одного этого современного максимума появились сообщения о структурной короне и о большой распространенности полярных сияний.

В интерпретации современной эпохи солнечной активности имеется неопределенность с точки зрения данных об углероде-14. Речь идет об эффекте Суэсса — о сильном снижении процентного содержания углеро-

да-14 в кольцах древесных стволов, образовавшихся с конца XIX века. Этот эффект объясняют поступлением в атмосферу больших количеств

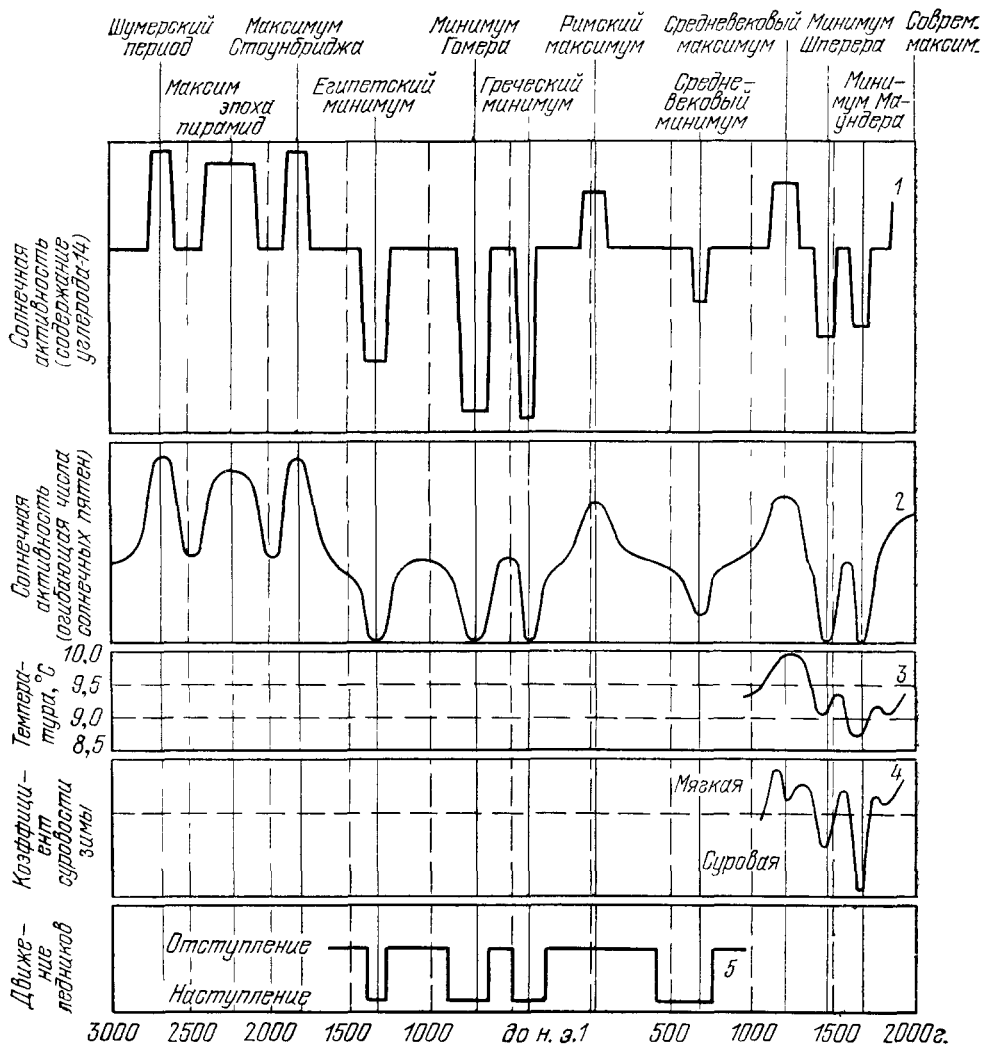


Рис. 6. Изменения солнечной активности, начиная с Бронзового века, определенные по процентному содержанию углерода-14 в годичных кольцах стволов реликтовых сосен.

Минимум Маундера использован для калибровки данных в зависимости от изменений на Солнце. Резкие возрастания содержания углерода-14 изображены на ступенчатой кривой (кривая 1), где высота и продолжительность пиков выведены по данным об углероде-14. Под ней изображена и построенная автором сглаженная историческая кривая 2 солнечной активности, которую можно интерпретировать как огибающую амплитуд возможного солнечного цикла. Из сравнения обеих кривых ясно, что за последние 5000 лет было по крайней мере 12 резких изменений солнечной активности, столь же четких, как и минимум Маундера; названия для отклонений в древности соответствуют историческим эпохам. Определенная в Англии средняя годовая температура, начиная примерно с 1000 г. нашей эры, изображена кривой 3, а суровость зимы в Париже и Лондоне — кривой 4. Ступенчатой нижней кривой 5 показаны отрезки времени, соответствующие наступлению и отступлению альпийских ледников. Можно видеть, что за 5000 лет рост и падение всех климатологических кривых происходит в соответствии с длительными изменениями солнечной активности.

углекислого газа с низким содержанием углерода-14, что связано с возросшим за последнее столетие во всем мире сгоранием ископаемого топлива. Ясно, что эффект Суэсса закрыл нам возможность использования

данных нашей эры об изменениях естественного поступления в атмосферу углерода-14. В результате нельзя использовать современные данные о солнечной активности для калибровки изменений количеств углерода-14 в прошлом.

□

У меня имеется возможность еще одного сопоставления, которое как когда-то предположил Маундер, может связать длительные изменения на Солнце с важными эффектами на Земле. Минимум Маундера почти в точности соответствует самому холодному времени «малого ледникового периода» — эпохи необычных холодов в Европе, длившихся с XVI века до начала XIX века. В наиболее холодные пики этого периода средняя температура была примерно на один градус Цельсия ниже, чем в наши дни (по данным английского климатолога Х. Х. Лемба). В этот период альпийские ледники спустились ниже, чем за все время, прошедшее с последнего главного оледенения, имевшего место 15 000 лет тому назад. Кроме того, в этот период в юго-западной Гренландии погибла колония Норзе, отрезанная от всего мира паковым льдом, который не таял год за годом. Можно ли связать эту климатическую аномалию — самую сильную за последнее тысячелетие — с длительным отсутствием солнечных пятен? Может ли исчезновение пятен на Солнце и изменение его вращения указывать на небольшое изменение потока солнечного излучения? Согласно современным моделям климата периоды глобального похолодания типа малого ледникового периода могут возникать в результате снижения полного излучения Солнца всего лишь на 1%, т. е. изменения, весьма малого и вряд ли поддающегося непосредственным измерениям, если оно происходит за десятилетия.

С другой стороны, минимум Маундера и малый ледниковый период могли быть аномалиями, не связанными между собой. Один из моих коллег предупреждал меня однажды, насколько опасно строить домыслы на основе таких простых совпадений; он заметил, что с таким же успехом можно постулировать связь минимума Маундера с временем царствования Людовика XIV. Можем ли мы сказать, что появление короля Солнца связано с длительным отсутствием солнечных пятен?

Однако теперь, когда доступны сведения об истории Солнца за более длительный период (в форме данных об углероде-14), можно искать существенные связи между изменениями на Солнце и климатом на Земле, сравнивая определенное по углероду-14 крупное изменение на Солнце с соответствующим по времени климатом. При проведении таких сравнений основные ограничения связаны с неопределенностью данных о климате: мы, видимо, лучше знаем теперь историю Солнца, чем историю нашей собственной планеты! Я провел сравнение определенной по углероду-14 истории Солнца с историей климата на земном шаре, реконструированной Лембом и др. по историческим записям и по данным о наступлении и отступлении альпийских ледников. Данные о Солнце и о климате «подошли» друг к другу, как ключ к замку. Каждое понижение солнечной активности типа минимума Маундера соответствует времени наступления ледников в Европе; каждое повышение солнечной активности, такое как средневековый максимум, совпадает со временем отступления ледников. Минимум солнечных пятен Шперера по глубине и продолжительности соответствует первой глубокой впадине на температурной кривой во время малого ледникового периода. Средневековый максимум солнечной активности соответствует хорошо изученной тепловой эпохе средневековья, когда средняя мировая температура совпадала с современной или была выше ее. Из этих результатов сравнения истории Солнца с историей

климата создается впечатление, что изменения на Солнце — доминирующий фактор климатических изменений, длящихся от 50 до нескольких сотен лет.

Забавно, что из явной связи изменений на Солнце с изменениями климата мало что можно выяснить относительно того, оказывают ли кратко временные изменения на Солнце, такие как 11-летний цикл, сильное влияние на кратковременные изменения климата. При изучении минимума Маундера или средневекового максимума мы рассматриваем не отдельные колебания солнечного цикла, а более длительную по времени огибающую, содержащую пики многих циклов. Возможно, что эта медленно меняющаяся огибающая отражает медленные изменения порядка нескольких процентов полной излучаемой Солнцем энергии. Эти изменения могут совершенно не зависеть от максимумов или минимумов 11-летнего цикла. Изменения излучаемой Солнцем энергии могут модулировать амплитуду или интенсивность непрерывной серии 11-летних циклов. Так же как и в случае модулированного по амплитуде радиосигнала, информацию несут не отдельные циклы непрерывной волны, а их изменяющаяся амплитуда, что легче всего заметить по огибающей пиков.

Интенсивность солнечного цикла может быть модулирована с помощью солнечного динамо, когда медленное изменение потока солнечной энергии меняет структуру конвективной зоны Солнца, а следовательно, и картину циркуляции на солнечной поверхности. Излучаемая Солнцем энергия может почти полностью не зависеть от фазы 11-летнего цикла. Такой механизм, быть может, объясняет, почему исследования связи между солнцем и погодой столь часто преисполнены разочарованиями, когда ищут корреляции с 11-летним циклом, который может оказаться лишь несущей частотой.

Создается впечатление, что Маундер и Шперер были правы, а большинство из нас ошибались. Как это часто бывает, в потоке современных данных мы слишком быстро забываем прошлое, забываем менее четко выраженную родословную солнечного цикла, открытие которого также когда-то явилось сюрпризом. Мы необоснованно считали, что современное поведение Солнца соответствует его нормальному поведению за много больший интервал времени.

Как люди и как ученые, мы всегда хотели, чтобы Солнце было лучше всех других звезд и лучше, чем оно есть на самом деле. Очень давно считали, что Солнце идеально, и, когда в телескоп увидели на Солнце пятна, утешались мыслью, что поведение этих пятен по крайней мере носит регулярный характер. Теперь выяснилось, что оба этих предположения не соответствуют действительности, но и окончательная картина еще неясна. Вместе с тем мы уже встали на путь более полного понимания Солнца и его существенного влияния на Землю.

#### ЛИТЕРАТУРА

J. A. Eddy. Science 192 (4245), 1189 (June 18, 1976).