

АРХЕОЛОГИЯ И ГЕОЭКОЛОГИЯ



Серия «Геоархеология. Этнология. Антропология»

2014. Т. 9. С. 2–33

Онлайн-доступ к журналу:

<http://isu.ru/izvestia>

ИЗВЕСТИЯ

Иркутского
государственного
университета

УДК 551.5:524.1

Малый ледниковый период. Часть 2. Гелиофизические и природно-климатические аспекты*

К. Г. Леви

Институт земной коры СО РАН

В. И. Воронин

Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН

Н. В. Задонина

Научно-исследовательский Иркутский государственный технический университет

С. А. Язев

Иркутский государственный университет

Аннотация. Представлен анализ природно-климатических обстановок на фоне изменения гелиофизических параметров, сложившихся в Европе и получивших название Малого ледникового периода. Считалось, что его возникновение связано с Маундеровским гранд-минимумом солнечной активности в период 1645–1715 гг. Однако комплексный анализ природно-климатических обстановок показал, что это явление было присуще больше Европе, чем прочим территориям, и было обусловлено комплексом причин. Приведенные ниже факты говорят о том, что правильнее называть эту эпоху Малым ледниковым периодом в Европе, который хотя и носил глобальный характер, но более ярко проявился на территории именно Западной Европы.

Ключевые слова: Малый ледниковый период, солнечная активность, Гольфстрим, дендрохронология, «лютые» зимы, экстремальные летние сезоны, ледовый покров Арктики.

Введение

С Малым ледниковым периодом связано множество гипотез, предположений и размышлений, целью которых было объяснить причины его возникновения. Однако до сего времени решение проблемы так и осталось найденным. В данном случае мы попытаемся дать собственное более или менее взвешенное объяснение явлениям, сопровождавшим Малый ледниковый период. К сожалению, нам не удалось достичь разумного консенсуса во взглядах

* Работа выполнена в рамках проекта СО РАН VIII.69.1. «Факторы, определяющие изменение среды и климата Центральной Азии в кайнозое».

на данное явление, и потому мы сохраним для публикации мнения соавторов для объективности излагаемого материала. Начнем с констатации ряда гелиофизических параметров, характеризующих проявления солнечной активности.

Некоторые характеристики солнечной активности и их влияние на погоду и климат

Для общего понимания ситуации приведем некоторые характеристики, которые, по мнению исследователей, могут оказывать существенное влияние на изменения погоды и климата на продолжительных интервалах времени.

Светимость Солнца $L_{\odot} = 3,827 \cdot 10^{33}$ эрг/с – количество энергии, выделяемой Солнцем в единицу времени. Предполагается, что светимость Солнца меняется во времени и отчасти из-за пятнообразовательной деятельности Солнца. Имеются указания, что после гранд-минимума Маундера к настоящему времени светимость Солнца возросла.

Солнечная корона – внешние слои атмосферы Солнца над хромосферой, в которой температура возрастает в 100 раз, простирается на 5 млн миль (1 амер. миля = 1609 м) от поверхности Солнца, что эквивалентно 12 его радиусам (радиус Солнца = 695 990 км).

Солнечная постоянная $S_0 = 3,84 \cdot 10^{26}$ Дж или $3,84 \cdot 10^{33}$ эрг – интегральный поток солнечного излучения, проходящий через единичную площадку, расположенную перпендикулярно направлению лучей, за пределами земной атмосферы на среднем расстоянии от Солнца (1 а. е. \approx 150 млн км). Однако, строго говоря, эта величина постоянной не является и колеблется в пределах 1367 ± 6 Вт/м². Она уменьшается или увеличивается за год на 0,1 %, что приводит к изменению глобальной температуры не менее чем на 0,1 К [Поток солнечного излучения ... , 1991]. Это приводит к изменениям турбулентности атмосферы и, вероятно, гидросферы, а также к существенным климатическим изменениям на длительных временных интервалах. На вариации величины S_0 влияют циклические изменения солнечной активности.

Солнечная активность – ряд явлений и процессов, определяемых изменениями магнитных полей в солнечной атмосфере, меняется циклично. Наиболее изучены 11-летние циклы Швабе – Вольфа и 22-летний цикл Хейла (двойной цикл Швабе – Вольфа). Причиной возникновения последнего является изменение полярности глобального магнитного поля Солнца. В развитии природных процессов нередко выделяется цикл Брикнера (продолжительность около 30–35 лет). Более длительные циклы активности менее выражены, как, например, вековой цикл Гляйсберга. Радиоуглеродные данные позволяют выявить сверхдлинные циклы продолжительностью до 2300–2400 лет (цикл Холлстатта) [The Sun and Climate, 2000].

Солнечная радиация – электромагнитное и корпускулярное излучение Солнца. Электромагнитная составляющая солнечной радиации распространяется со скоростью, близкой к скорости света, и проникает в атмосферу и внешние оболочки «твердой» Земли. Спектр электромагнитного излучения Солнца варьирует от радиоволн до рентгеновских лучей, но максимум интенсивности приходится на его видимую (желто-зеленую) часть (рис. 1).

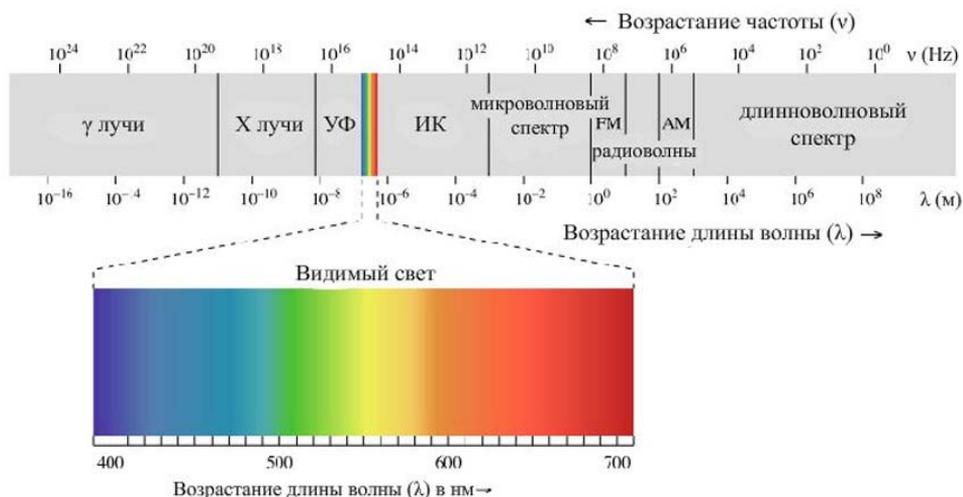


Рис. 1. Спектр солнечного излучения

Корпускулярная часть солнечной радиации состоит из протонов, движущихся от Солнца со скоростями 300–450 км/с (солнечный ветер). При солнечных вспышках образуются частицы больших энергий, в основном протоны и электроны, являющиеся солнечной компонентой космических лучей. Вклад корпускулярного излучения в солнечную радиацию невелик и не может сравниться с вкладом электромагнитного излучения, характеризующегося индексами Аа, Кр, Ар и др. На рис. 2 приведены вариации значений Аа-индекса магнитных бурь на фоне изменения чисел Вольфа, отражающих солнечную активность по времени. Видно, что кривые в основном конформны друг другу, хотя иногда всплески электромагнитного излучения происходят и на нисходящих ветвях максимумов циклов Швабе – Вольфа и даже в периоды минимумов солнечной активности. Фурье-анализ временных рядов изменения, солнечной активности в числах Вольфа и электромагнитного излучения выраженного в Аа-индексах, указывает на несовпадения продолжительностей их гармоник (табл. 1), что, возможно, и объясняет некоторые смещения и всплески значений Аа-индекса, отмеченные выше. В целом же электромагнитное излучение является главным источником энергии для всех процессов, протекающих на поверхности и в атмосфере Земли (здесь уместно сравнение с микроволновой СВЧ-печью). Количество поступающей солнечной радиации на Землю зависит от высоты Солнца, времени года и прозрачности атмосферы. Именно солнечная радиация определяет изменения климата на Земле.

Таблица 1

Продолжительности гармоник, характеризующих вариации W и Аа-индекса

Индексы/ № гармоники, годы	1	2	3	4	5	6
Числа Вольфа, W	–	–	8–12	28	35	
Аа-индекс	0,5	5,25	10–12	23–28	–	70

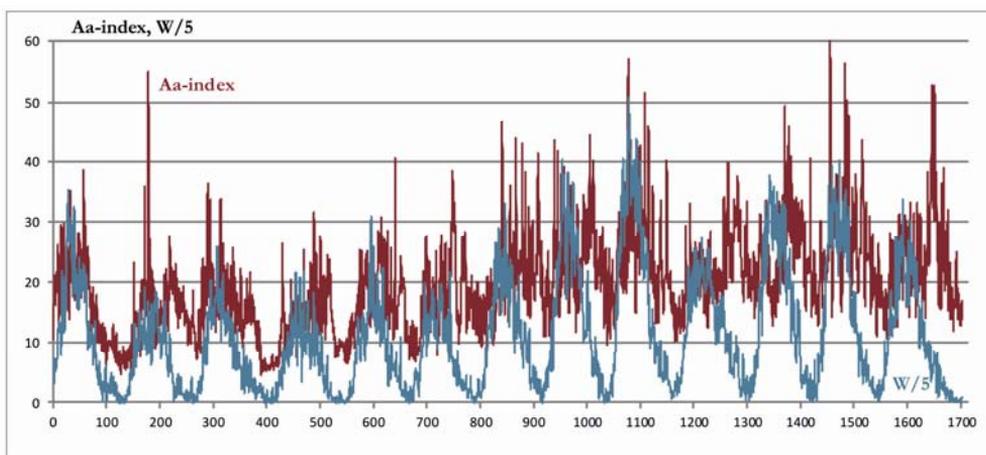


Рис. 2. Помесячные вариации Аа-индекса магнитных бурь и солнечной активности в числах Вольфа. Числа Вольфа $W/5$ уменьшены в 5 раз для наглядности. По оси абсцисс номера месяцев, начиная с января 1868 г. по октябрь 2008 г. Значения Аа-индекса заимствованы по [Константиновская, 2009]

Ультрафиолетовая часть спектра поглощается в высоких слоях атмосферы и способствует образованию озона на высотах 30–40 км. Ультрафиолетовые лучи образуются при хромосферных вспышках на Солнце. В свою очередь озон интенсивно поглощает солнечные лучи и нагревается, что влияет на характер воздушных потоков в низких слоях атмосферы и изменения погоды.

Инсоляция земной поверхности – поток электромагнитной энергии на подстилающую поверхность, зависящий от угла восхождения Солнца над горизонтом и варьирующий от широты местности, прозрачности атмосферы и плотности облачного покрова.

Погода характеризуется мгновенным состоянием температуры, влажности, атмосферного давления, скорости и направления ветров, но отклонение этих характеристик от средней многолетней нормы еще не является изменением климата, для определения которого необходим длительный тренд, описывающий общие тенденции временного хода в главных характеристиках атмосферы за длительный период времени.

Климат – усредненное значение погодных характеристик за промежуток времени порядка сотен лет.

Исходя из сказанного выше, мы приходим к выводу о том, что наиболее важную роль в погодно-климатических изменениях играют прежде всего электромагнитное излучение Солнца и солнечный ветер, которые способны нарушать глобальную циркуляцию атмосферных потоков и приводить к изменениям турбулентных процессов в гидросфере. Иногда считают, что многие солнечные воздействия носят постоянный или слабо изменяющийся во времени характер. Однако система геосфер Земли имеет способность накапливать некоторое количество солнечной энергии, и когда оно начинает превышать допустимые для системы объемы, вся система стремится сбросить в окружающее пространство избыточную энергию исключительно для сохра-

нения равновесия. Поскольку физические свойства геосфер сильно разнятся между собой, выбросы избыточного количества энергии происходят с разной периодичностью, что приводит к временному несовпадению максимумов и минимумов активности различных природных процессов, которые в свою очередь ведут к восстановлению равновесия системы в целом.

Нечто подобное мы наблюдали при тектонофизическом моделировании развития сдвигового разлома в земной коре. Коротко остановимся на условиях этих экспериментов [Леви, Борняков, 1987]. На специальный стол, состоявший из двух горизонтальных рифленых пластин, перемещавшихся горизонтально друг относительно друга с постоянной скоростью, помещалась модель из упруго-вязкого пластичного материала, имитировавшего земную кору с учетом условий подобия. На поверхности модели измерялись ее вертикальные деформации. Обнаружилось, что изменения величины амплитуд вертикальных A_V и горизонтальных A_H движений в эксперименте указывают на противофазное проявление горизонтальной и вертикальной компонент движений на модели из упруго-вязкого пластичного материала при постоянном приложении нагрузки (рис. 3). При этом наблюдается проявление положительных A_V в периоды уменьшения скорости горизонтальных движений, а отрицательных A_V – в периоды их увеличения. Это может быть объяснено тем, что при постоянной нагрузке вся система накапливает деформации и при достижении их предельных значений в соответствии с реологическими свойствами среды реализуется всплесками изменения амплитуд обеих компонент движений, но в противофазе.

Вероятно, нечто подобное мы наблюдаем и в отношениях между солнечным электромагнитным излучением, солнечным ветром и системой «атмосфера – гидросфера».

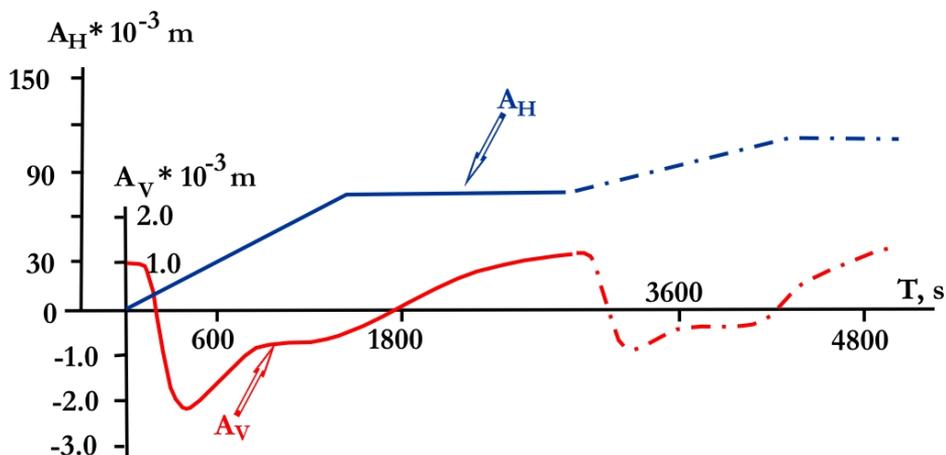


Рис. 3. Соотношение вариаций амплитуд горизонтальных A_H и вертикальных A_V движений на тектонофизической модели сдвигового разлома [Леви, Борняков, 1987]

Исторические свидетельства о природных изменениях на длительных интервалах времени

В начале нашего исследования мы обратимся к современной зимней ситуации в Северном полушарии (рис. 4). Следует обратить внимание на «зеленую» Европу на фоне необъятных снежных просторов. Эта ситуация достаточно обычна для зимней Западной Европы на протяжении многих лет. Об этом сообщают и исторические хроники, упоминающие о фактах мягких дождливых зим в этом регионе. Так было на протяжении многих столетий. Однако сегодня СМИ сообщают о больших погодных пертурбациях в Западной Европе. Странные, на первый взгляд, атмосферные явления – ливни и наводнения, снежные штормы с аномальными высотами снежного покрова – происходят практически почти одновременно на разных европейских территориях и в Северной Америке.

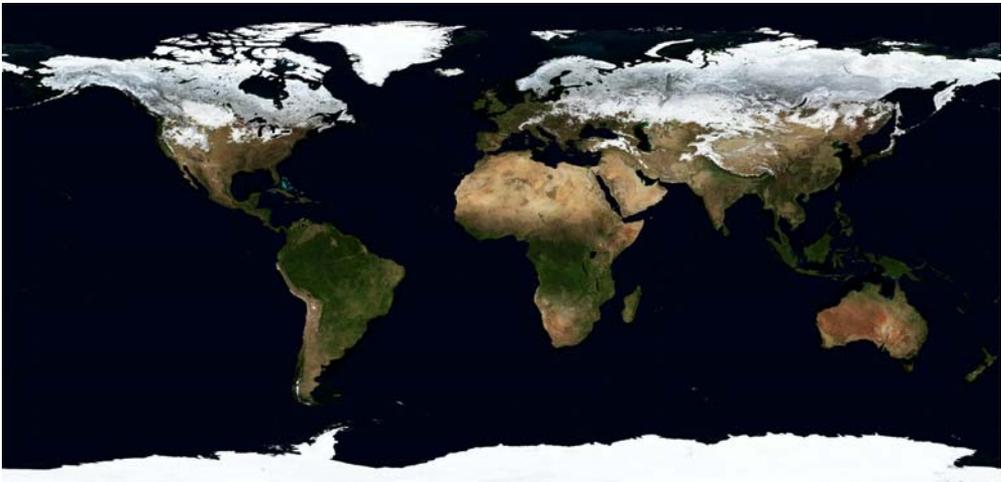


Рис. 4. Современный снежный покров – январь в Северном полушарии [Современный снежный покров ...]. Альбеда снежного покрова – 70–80 %, летней зеленой поверхности – до 25 %. Площадь снежного покрова в Северном полушарии в среднем $46,7 \times 10^6$ км² и варьирует в пределах $\pm 1,5$ %. Во время Малого ледникового периода площадь снежного покрова могла увеличиваться на 3 % и более за счет появления снегов в Западной Европе

Возникает естественный вопрос – в чем дело? Почему в мягкой по погодным условиям Европе происходят такие катаклизмы? Привыкшие к мягким зимам европейцы «стонут» от контрастных погодных условий сегодня. Ответ на этот вопрос мы постараемся дать ниже.

Для начала озаботимся вопросом о времени проявления Малого ледникового периода. На этот счет существует масса разноречивых сообщений. Одни называют начальную точку отсчета 1500–1520 гг., а завершают его серединой XX в., другие – 1200–1300 гг. Рассмотрим ряд свидетельств этого события.

Чтобы понять, что происходило в средние века в Западной Европе, обратимся к историческим хроникам. Они сообщают, что в 1645–1715 гг. отмечалось наступление альпийских ледников, многие реки покрывались льдом, и было достаточно холодно. Задумаемся, что необходимо для расширения площади ледникового покрова. Первое условие – высокая влажность, многоснежные зимы и прохладные летние сезоны, обеспечивавшие длительное залеживание снега. В наше время такое иногда происходит в Шотландии. Слишком холодные погоды способствуют вымораживанию влаги из воздуха и его иссушению.

Таким образом, лютые холода, упоминаемые в хрониках, по ощущениям таковыми на самом деле могли и не являться. По современным данным, морозы $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в Европе уже считаются «лютыми», тогда как в Зауралье температура воздуха нередко опускается ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, и это считается нормальным явлением. Период холодных зим во время Малого ледникового периода мог на самом деле являться периодом влажных зим и прохладных летних сезонов. Как правило, исторические хроники классифицируют зимние холода в трех вариантах – мягкие теплые, холодные и «лютые» зимы, когда лед сковывал реки Европы, в другие годы редко замерзающие. Не исключена ситуация, когда в условиях Малого ледникового периода водоемы замерзали не от лютых морозов, а от долговременного дефицита тепла, когда вода сильно остывала зимой и плохо прогревалась летом.

Наблюдения метеопараметров (температуры воздуха, атмосферного давления и влажности воздуха) в Западной Европе ведутся около 150 лет, и поэтому судить о похолоданиях и потеплениях в историческом прошлом можно лишь по сообщениям, базирующимся на ощущениях наблюдателей. Особого внимания заслуживают сообщения о сильном похолодании во второй половине XVII – начале XVIII в. в Западной Европе, часто неточно именуемом Малым ледниковым периодом, совпавшим с известным солнечным минимумом Маундера в 1645–1715 гг. [Eddy, 1976, 1977]. Однако обвинение Маундеровского минимума в глобальном похолодании, как будет показано ниже, может оказаться незаслуженным.

В целом сообщения наблюдателей о холодах прошлого с трудом поддаются оцифровыванию, поскольку, как мы уже упоминали, базируются на ощущениях, которые обычно весьма индивидуальны. Подлили масла в огонь для суждений о сильном похолодании в Европе и великие художники средневековья – голландцы, британцы, французы и германцы, на картинах которых живописно передавались образы угнетенной морозами природы. Отнесемся непредвзято к сигналам из прошлого и будем использовать их только как сообщения о необычном проявлении зимних сезонов. Данные о суровых («лютых») и теплых зимах были просуммированы по десятилетиям и сопоставлены с вариациями солнечной активности (рис. 5). Именно временное чередование «лютых» и теплых зим свидетельствует о контрастности погодных условий в течение десятилетий. Сравнение показывает, что их соотношение во времени меняется: наблюдается плавное повышение числа суровых зим по мере продвижения из прошлого в настоящее. Особенно явно указанная тенденция прослеживается с начала XIX в., спадая на рубеже XXI в.

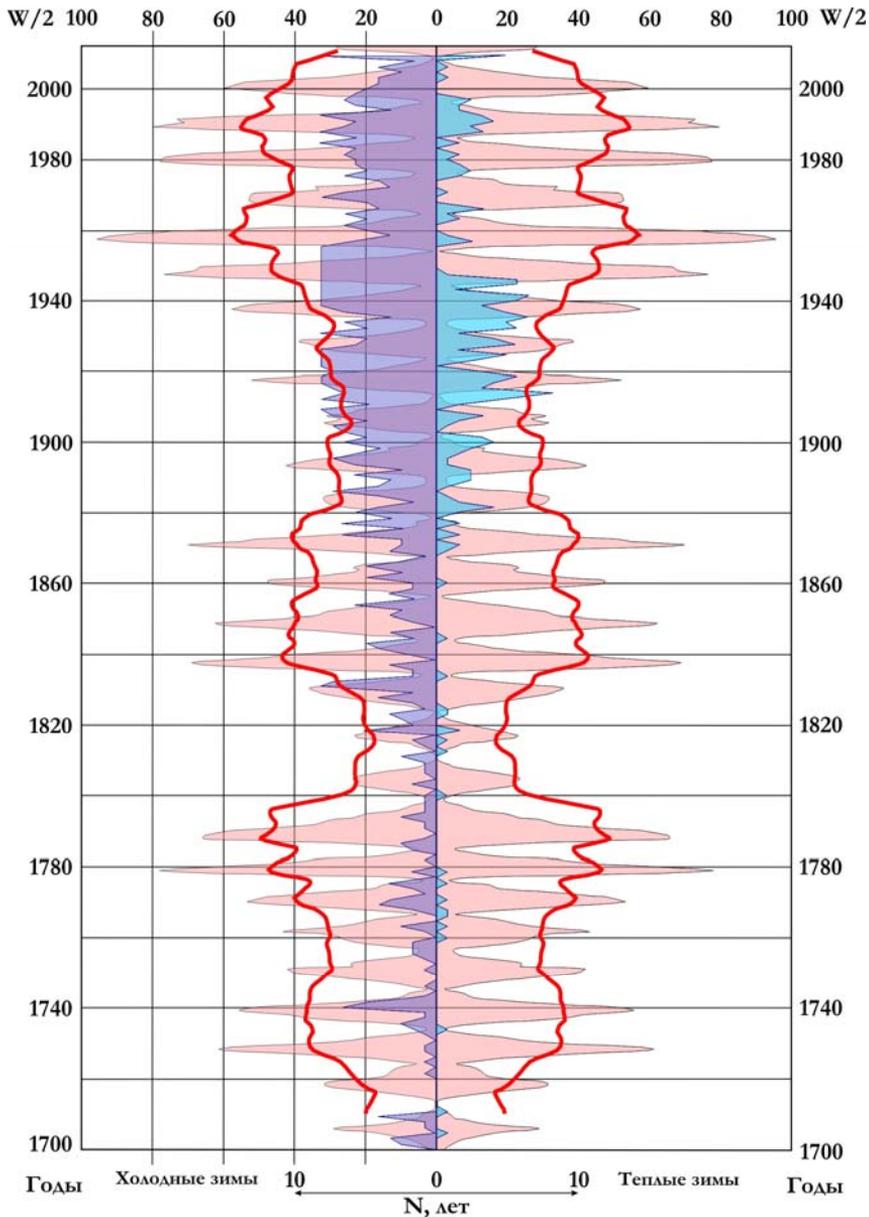


Рис. 5. Соотношение числа суровых («лютых») и теплых зим на фоне вариаций солнечной активности, выраженной в числах Вольфа. Утолщенная красная кривая – вариации солнечной активности, сглаженные 11-летним окном

Кросс-корреляционный анализ числа суровых («лютых») и теплых зим в связи с вариациями солнечной активности (рис. 6) показывает, что максимумы числа «лютых» зим повторяются с периодом 40–50 лет, а теплых – с периодом около 100–120 лет. Но наша выборка не затрагивает Маундеровского гранд-минимума солнечной активности, просто в каталоге Вольфа нет сведений о пятнообразовательной деятельности Солнца в XVI–XVII вв. Мы распо-

лагаем лишь историческими сообщениями о суровости зим этого периода. Однако следует помнить, что ряды исторических сообщений неоднородны и в них часто наблюдаются пропуски. Тем не менее на рис. 5 следует обратить внимание на соотношение периодов проявления теплых и «лютых» зим по интервалам времени, что, в сущности, и отражает контрастность погод.

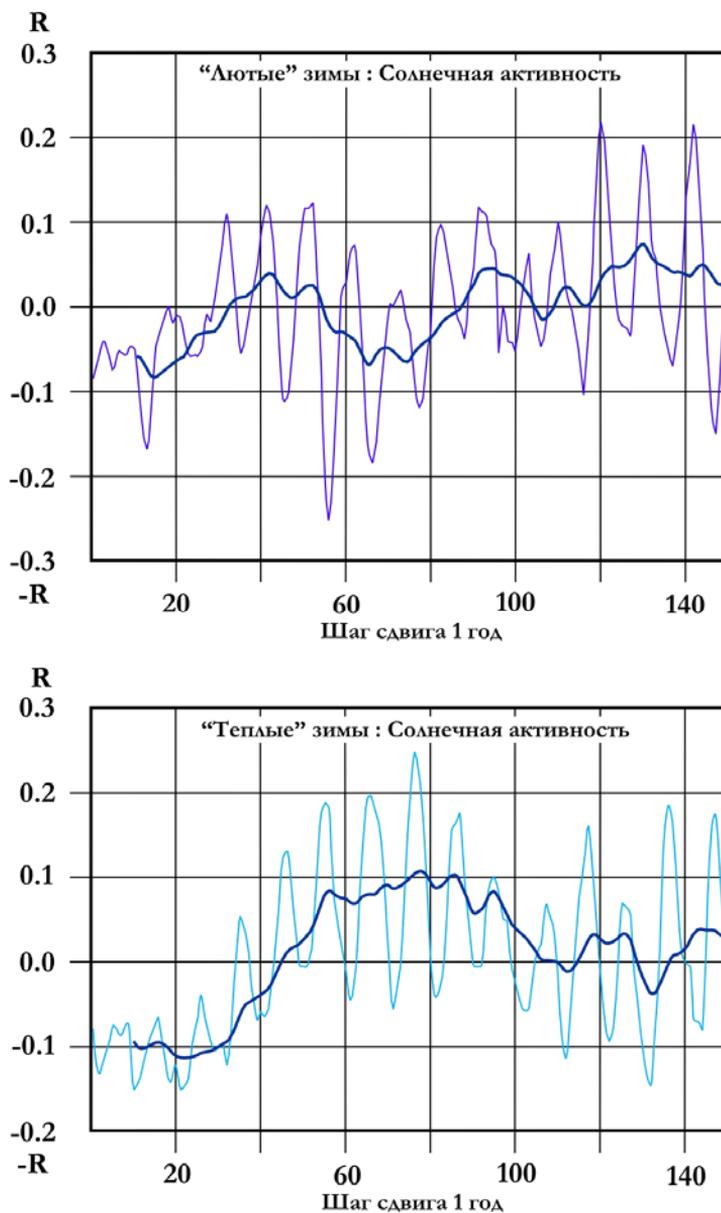


Рис. 6. Кросс-корреляция теплых и «лютых» зим с вариациями солнечной активности

В действительности, судя по описаниям зимних условий в Западной, Восточной Европе и, отчасти, в Азии, они могут быть разделены на условные категории и проиндексированы следующим образом: теплым зимам с дождями и даже наводнениями присваивается индекс «-1», обычным, рядовым зимам, о которых порой просто не упоминали, – «0», суровым зимам с сильными ветрами, снегопадами и метелями – «1», «лютым», когда стояли сильные морозы и замерзло большинство водоемов, – «2». Такая индексация зим позволила построить кривые суровости зим, приведенные на рис. 7. Там же помещена кривая частоты повторяемости полярных сияний, характеризующих вспешечную активность Солнца, которая возрастает в периоды высокой солнечной активности (голубое поле на рис. 7). Данные для этих построений заимствованы из каталогов [Schove, 1954; Гелиогеодинамика ... , 2012].

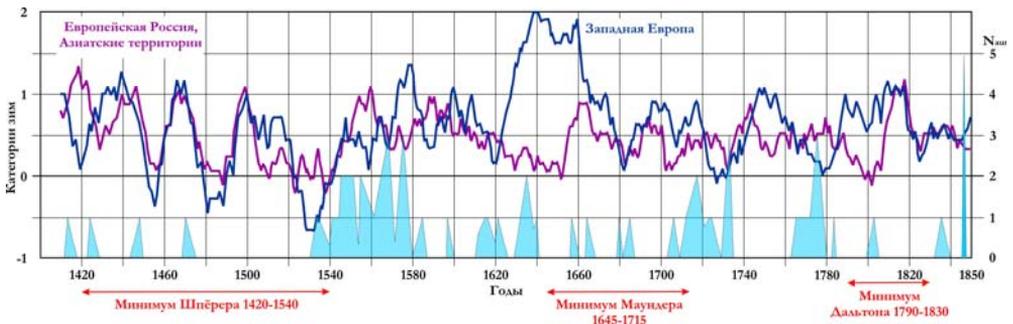


Рис. 7. Вариации категорий зим во времена минимумов Шпёрера, Маундера и Дальтона [Schove, 1955; Гелиогеодинамика ... , 2012]

Следует отметить, что полярные сияния не прекращались в период Маундера, что указывает на то, что солнечная активность, как минимум, не падала до нуля в эту эпоху.

Для анализа изменения во времени категорий зим в периоды минимумов Шпёрера, Маундера и Дальтона в Европе, России и некоторых азиатских регионах был определен временной интервал 1400–1850 гг. Такой выбор был не случаен. Он обусловлен тем, что с середины XIX в. уже начались постоянные гидрометеорологические наблюдения за атмосферными процессами и оценки суровости зим по ощущениям потеряли свой первоначальный смысл.

Из рис. 7 следует, что холодные зимы в Западной Европе носили по времени более масштабный характер, чем в Восточной Европе и некоторых азиатских странах, где они наступали несколько позже и не были столь продолжительными.

Дендрохронологические свидетельства

Непосредственными свидетелями масштабных по времени потеплений и похолоданий являются данные дендрохронологических исследований. Сравнивая кривые вариаций TR-индексов древесно-кольцевых хронологий Скандинавии и п-ова Ямал (север Сибири) (рис. 8 и 9), обнаруживаем, что ком-

фортность произрастания древостоев, зависящая от смены потеплений-похолоданий (комплексного влияния таких факторов, как инсоляция земной поверхности, влажность среды и вариации концентрации CO_2 в атмосфере), существенно меняется по времени. Древостои четко указывают на периоды длительных похолоданий, по длительности явно превышающих продолжительности солнечных гранд-минимумов, и позволяют значительно детализировать погодно-климатические условия среды их обитания.

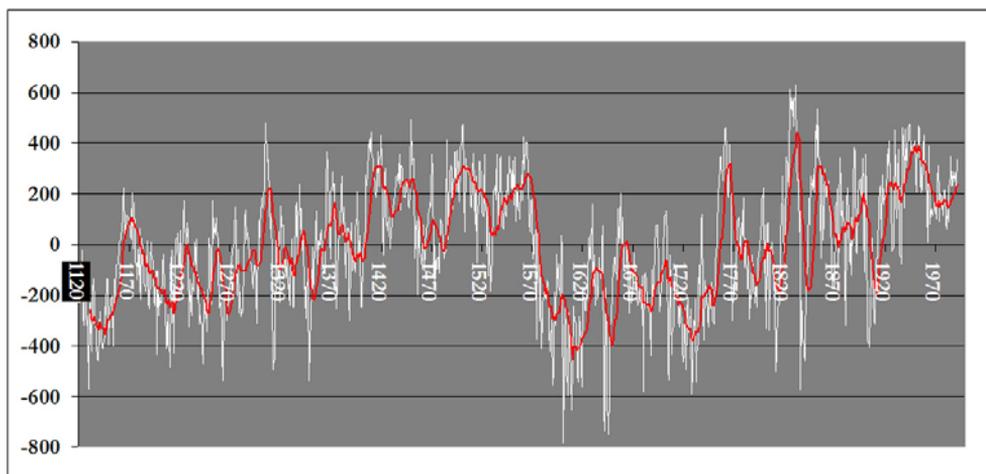


Рис. 8. Сводная древесно-кольцевая хронология TR (1120–1980 гг.) для Скандинавии [National Climatic Data Center]. Вертикальная ось – значения TR-индексов, горизонтальная – годы нашей эры

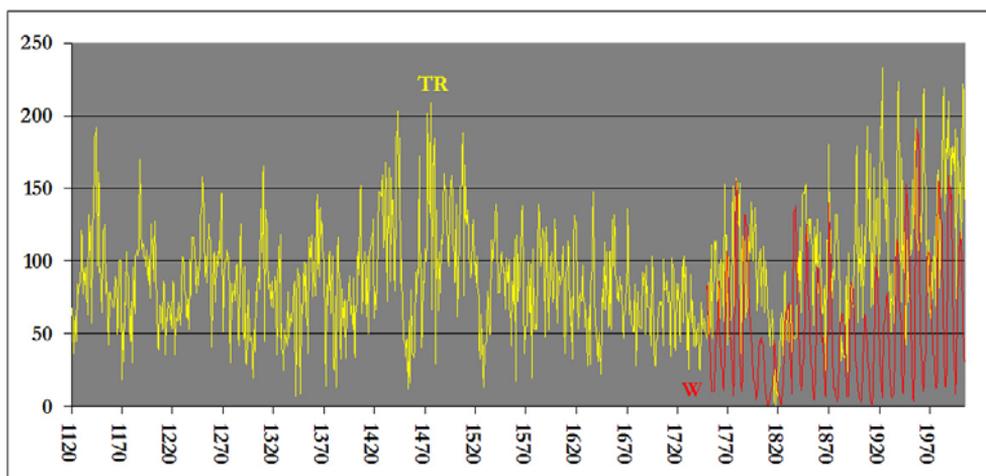


Рис. 9. Древесно-кольцевая хронология TR (1120–2005 гг.) с п-ова Ямал, Западная Сибирь [Гелиогеодинамика ... , 2012]. Вертикальная ось – значения TR-индексов и W – вариации чисел Вольфа с 1700 г., горизонтальная – годы нашей эры

В Скандинавии древесно-кольцевые хронологии характеризуют интервал времени от 1120 г. и показывают довольно резкое наступление Малого ледникового периода. Судя по этим данным, он начался в 1570-х гг. и продлился около 180 лет до 1750 г., хотя и прерывался сравнительно короткими потеплениями. Роль Маундеровского минимума (1645–1715 гг.) в возникновении этого похолодания выглядит весьма скромной. Конечно, недостаточная инсоляция земной поверхности имела место, но только лишь усугубила ситуацию.

В Западной Сибири это похолодание, судя по древесно-кольцевым хронологиям, началось в 1520-х гг., а закончилось тоже в 1750-х. Начиналось оно плавно, но закончилось достаточно быстрым потеплением. Вообще говоря, комфортность произрастания растительных сообществ севера Западной Сибири тесно коррелирует с вариациями солнечной активности (см. рис. 9).

Таким образом, мы можем констатировать, что термин «Малый ледниковый период» применим исключительно для Западной Европы. Именно там мы наблюдаем отчетливую контрастность погодно-климатических условий. Само по себе наступление такого длительного похолодания было, скорее всего, обусловлено специфическим развитием комплекса атмосферно-гидросферных процессов, в числе которых гипотетическое воздействие гранд-минимума Маундера может рассматриваться лишь как отдельный эпизод.

Гляциологические причины

Для оценки климатических изменений в геологии и гляциологии используются сведения о концентрации во льдах и геологических образованиях космогенных изотопов ^{14}C , ^{10}Be (рис. 10) и тяжелого изотопа $\delta^{18}\text{O}$ (рис. 11). Эти изотопы позволяют достаточно детально реконструировать вариации солнечной активности и средней температуры воздуха на достаточно продолжительных интервалах времени, измеряемых тысячами, десятками и сотнями тысяч лет. На рис. 10 отчетливо видно, что всплески скорости образования изотопов ^{14}C и ^{10}Be тяготеют к известным гранд-минимумам солнечной активности Оорта (O), Вольфа (W), Шпёрера (S), Маундера (M), Дальтона (D) и Гневешева (G).

На рис. 11 представлена кривая концентрации $\delta^{18}\text{O}\%$, полученная по материалам ледового керна из скважины GISP2 в Гренландии [Чумичёв, 2013 со ссылкой на Carter, 2007]. Кривая показывает, что устойчиво прохладный период начался в VI–VII вв. и длился вплоть до середины XX в. Параллельно на этом рисунке приведена древесно-кольцевая хронология для севера Западной Сибири [Гелиогеодинамика ... , 2012]. Учитывая условия комфортности произрастания древостоев, можно утверждать, что данные дендрохронологии позволяют детализировать состояние окружающей среды как в периоды похолоданий, так и в периоды потеплений. Учитывая сказанное, можно констатировать, что причиной возникновения Малого ледникового периода явились масштабные перестройки в системе «атмосфера – гидросфера».

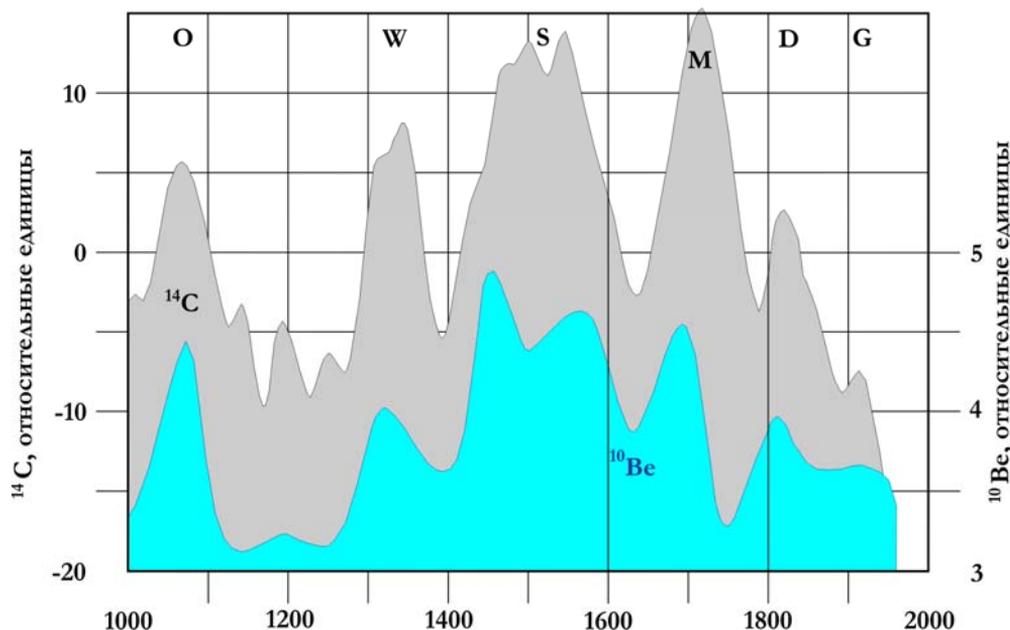
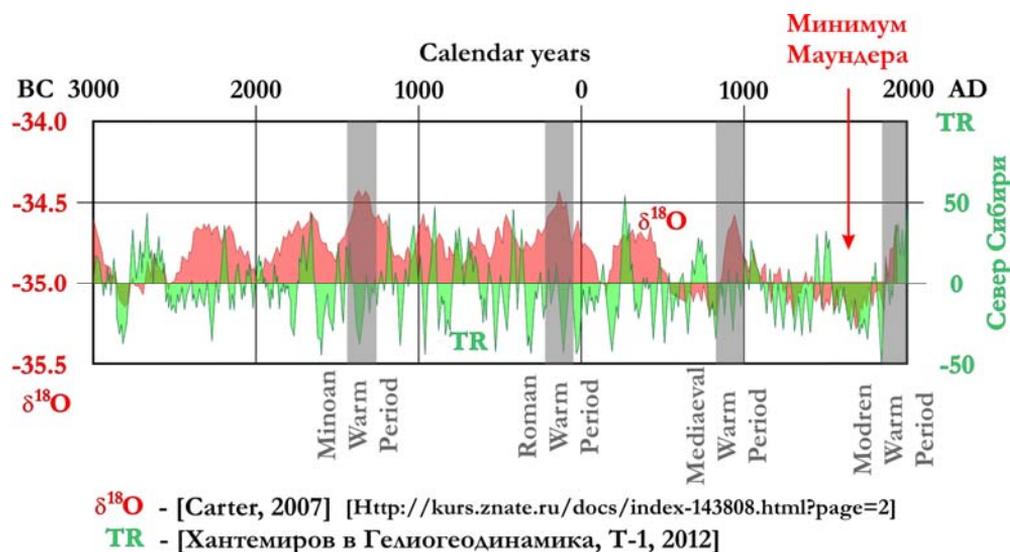


Рис. 10. Совместные вариации скорости образования изотопов ^{14}C и ^{10}Be на фоне известных гранд-минимумов O, W, S, M, D и G [Распопов, Дергачев, 2006]



$\delta^{18}\text{O}$ - [Carter, 2007] [<http://kurs.znate.ru/docs/index-143808.html?page=2>]

TR - [Хантемиров в Гелиогеодинамика, Т-1, 2012]

Рис. 11. Вариации концентрации изотопа $\delta^{18}\text{O}$ ‰ за последние 5 тыс. лет по материалам ледового ядра из скважины GISP2 в Центральной Гренландии и TR-индекса прироста древесины

Гелиофизические и метеорологические причины

Проанализируем распределение по времени гранд-минимумов и разделяющих их периодов относительно повышенной солнечной активности (для простоты изложения назовем их условно гранд-максимумами, хотя такого термина в гелиогеофизике и не существует) за прошедшие 2 тыс. лет. Для этого используем две временные характеристики этих аномалий: 1 – положение на временной шкале середин гранд-минимумов и гранд-максимумов; 2 – длительность их существования в годах (рис. 12).

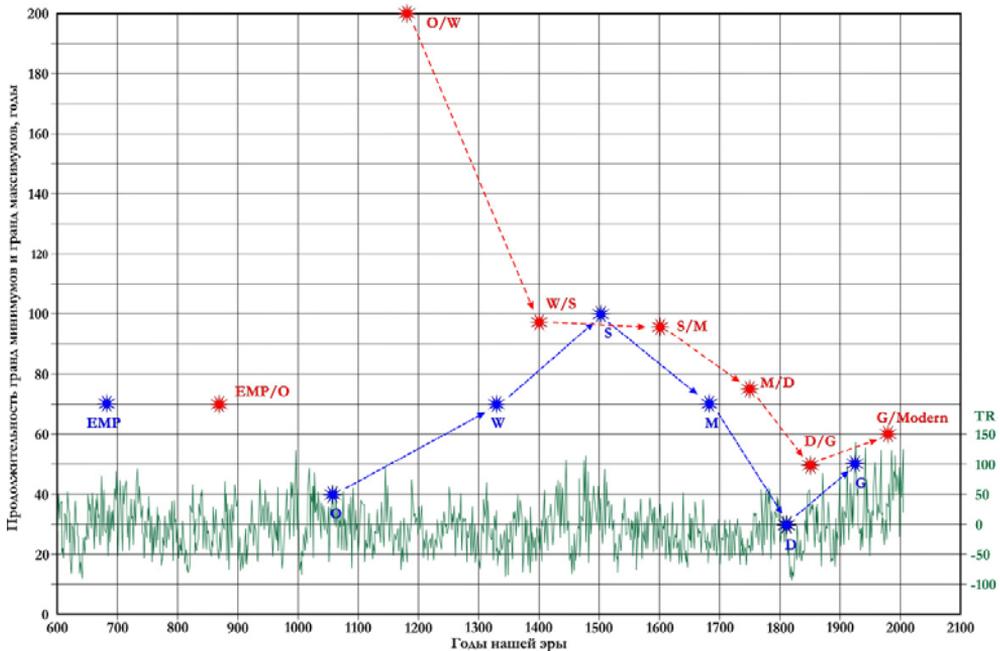


Рис. 12. Главные гранд-минимумы солнечной активности на фоне древесно-кольцевой хронологии 600–2005 гг. как отражение комфортности произрастания древостоев. Обозначения минимумов: EMP – раннесредневековый, O – Оорта, W – Вольфа, S – Шпёрера, M – Маундера, D – Дальтона, G – Гневышева. Красные звездочки – гранд-максимумы солнечной активности

Из анализа кривых на рис. 12 следует, что продолжительность гранд-минимумов солнечной активности закономерно увеличивается от минимума Оорта к минимуму Шпёрера и затем почти симметрично уменьшается к минимуму Дальтона, как бы образуя некий цикл продолжительностью 700–800 лет. Иную картину мы наблюдаем в изменении продолжительностей гранд-максимумов. Они закономерно укорачиваются от O/W к D/G.

Реконструированные аномалии средней температуры приземного слоя атмосферы варьировали в достаточно широких пределах температур и времени (рис. 13).

циями Понта Делгада (Азорские о-ва) и Акурейри (Исландия), характеризующих состояние азорского максимума и исландского минимума. Различают положительную фазу САК, когда наблюдается отрицательная аномалия температуры поверхности океана в Лабрадорском, Северо-Атлантическом и Канарском течениях и положительная в Гольфстриме, и отрицательную фазу при обратном положении вещей...» [Нестеров, 2013]. На рис. 14 отчетливо выделяются положительные и отрицательные фазы АМО (САК).

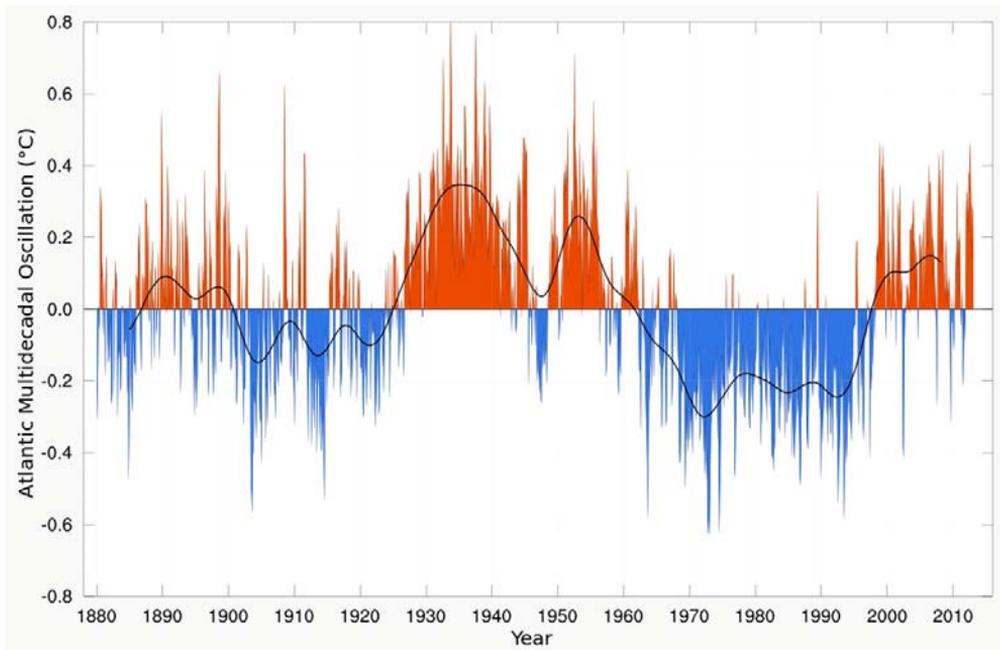


Рис. 14. Вариации разности нормализованных температур поверхности океана на станциях в Исландии и на Азорских о-вах, характеризующих фазы АМО [Северо-Атлантическая осцилляция]

Традиционно считается, что «печкой» Западной Европы является теплое струйное океанское течение Гольфстрим. Оно представляет собой систему течений, простирающуюся от п-ова Флорида до Скандинавии, Шпицбергена, Баренцева моря и Северного Ледовитого океана. Ширина потока составляет 70–90 км на юге, увеличивается до 100–120 км на широте пролива Хаттерас и охватывает океанские воды до глубины 0,7–0,8 км. Ежегодная тепловая мощность Гольфстрима оценивается $1,4 \cdot 10^{15}$ Дж. Температура на поверхности потока достигает $+25^\circ\text{C}$ в Мексиканском заливе, а его скорость – 6–10 км/ч и уменьшается до 3–4 км/ч у Ньюфаундлендской банки. Теплые воды Гольфстрима обогревают нижние слои атмосферы над океаном, а западные ветры переносят это тепло в Европу.

Сегодня мы располагаем приближенными оценками приращения температуры воды в потоке с середины 1870-х гг. до наших дней. На рис. 15 приведены вариации значений приращения температур в районе п-ова Флорида, где Гольфстрим зарождается как океанское течение, и у п-ова Новая Шотландия на побережье Канады [Вариации температуры Гольфстрима]. Видно, что вариации приращения температур на юге и севере несколько различаются тем, что упомянутые вариации более контрастны на севере. Для получения объективной информации о температурном режиме течения были оценены средние значения приращений (рис. 16 и 17).

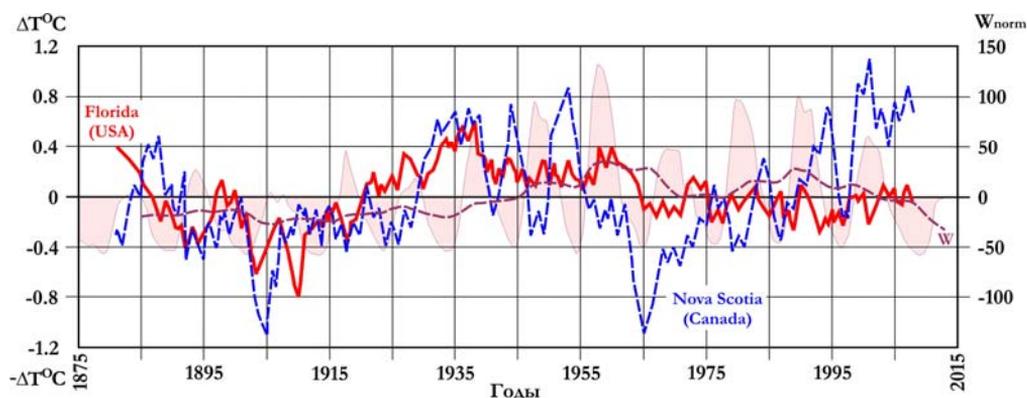


Рис. 15. Изменения во времени приращений температуры воды океанского течения Гольфстрим у побережий Флориды (США) и Новой Шотландии (Канада) [Вариации температуры Гольфстрима]

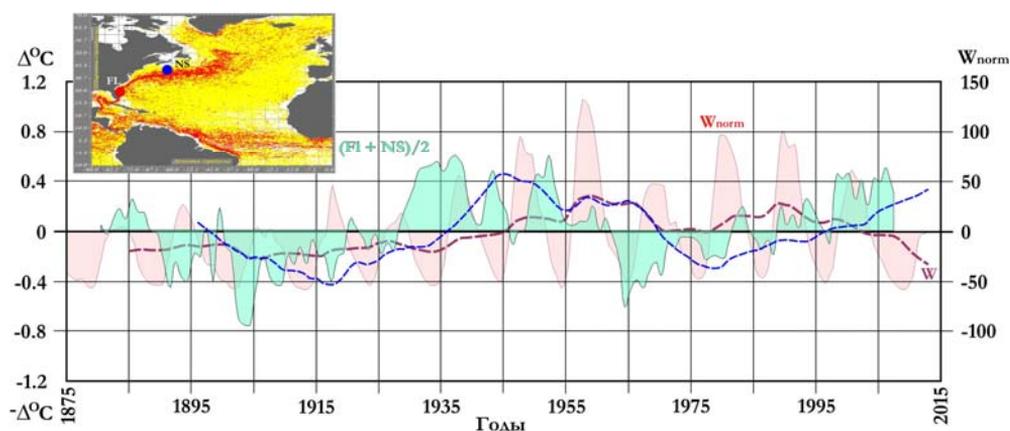


Рис. 16. Вариации средних приращений температуры Гольфстрима для пунктов Флорида – Новая Шотландия на фоне вариаций солнечной активности. На врезке [Бондаренко, 2013] показано расположение пунктов наблюдений

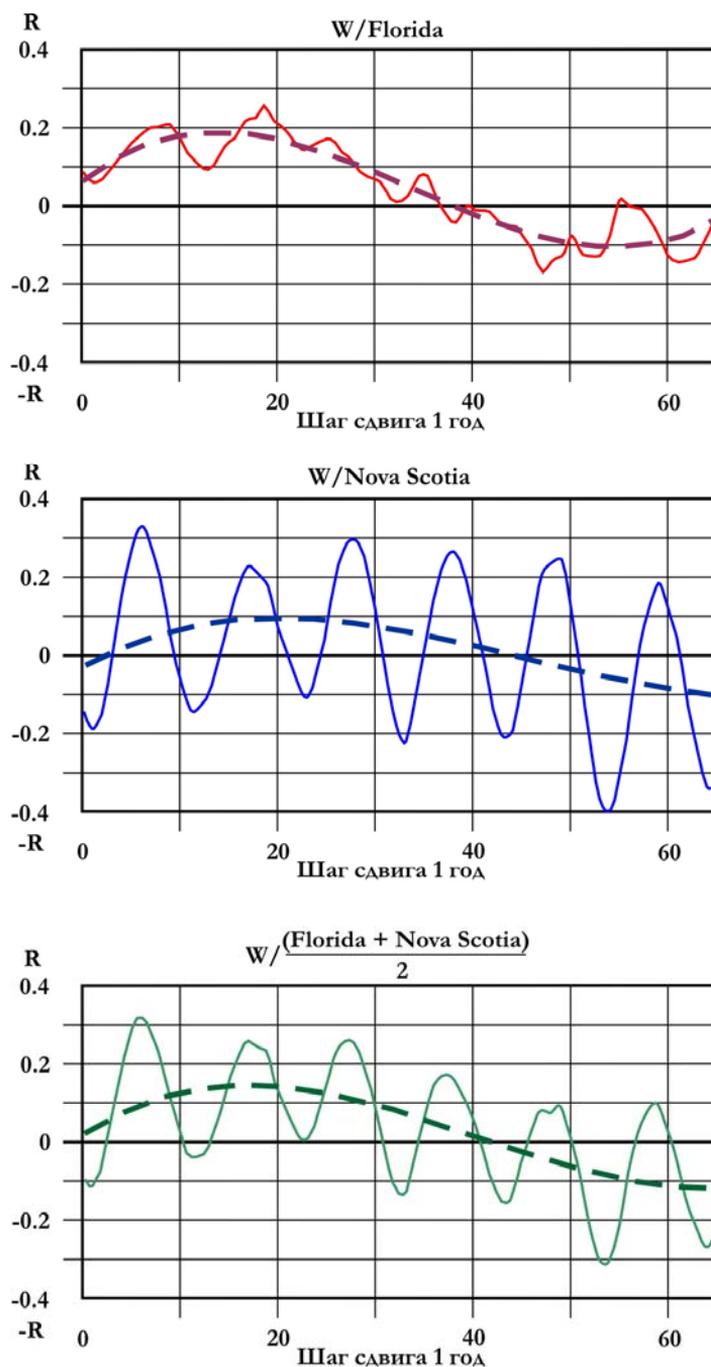


Рис. 17. Результаты кросс-корреляционного анализа приращений температуры Гольфстрима для пунктов Флорида, Новая Шотландия и средних на фоне вариаций солнечной активности

Выполненный кросс-корреляционный анализ приращений температуры для пунктов Флорида, Новая Шотландия и средних на фоне вариаций солнечной активности приведен на рис. 17. Красная, синяя и зеленая кривые – результат собственно кросс-корреляции, а фиолетовый, коричневый и зеленый пунктиры отражают общие тенденции изменения температурного режима Гольфстрима, описываемые полиномом третьего порядка. Все кривые схожи между собой и показывают, что относительное повышение и понижение температуры потока происходят с полупериодом 40–50 лет, т. е. полный цикл составляет около 100 лет. Отсюда можно допустить, что «похолодание» Гольфстрима должно было наблюдаться в конце XIX – начале XX в. (гранд-минимум Гневышева), в конце XVIII – начале XIX в. (гранд-минимум Дальтона), в начале XVII и до начала XVIII в. (гранд-минимум Маундера). Температурный режим Гольфстрима в определенной мере связан с Северо-Атлантическим колебанием, формирующимся под действием долговременных вариаций солнечной активности, оказывающих существенное влияние на изменение атмосферной циркуляции. При этом максимум теплоотдачи Гольфстрима запаздывает на половину продолжительности локальных максимумов солнечной активности Швабе – Вольфа.

Еще на одном важном моменте следует остановиться. Это вариации скорости течения Гольфстрима, измеряемые буями-дрифтерами. На рис. 18 мы можем заметить, что в начале пути скорость течения от Флориды до Ньюфаундлендской банки имеет максимальные значения и далее уменьшается почти вдвое и остается в максимумах почти постоянной с флуктуациями 15–30 дней [Бондаренко], причем максимальные скорости наблюдаются в тех районах, где течение испытывает завихрения, причиной которых могут быть неровности на поверхности дна, подстилающего поток (рис. 19).

Однако здесь следует отметить, что отдача тепла быстротекущими нагретыми жидкостями в окружающее пространство предельно мала, а при низкой скорости потока воды в Гольфстриме теплоотдача становится максимальной. Далее в присутствии воздушных потоков в Северной Атлантике западно-восточного направления обеспечивает формирование мягких погодноклиматических обстановок в Западной Европе. Вносят свой вклад в охлаждение и замедление скорости Гольфстрима и стоковые ветры с Гренландского ледникового щита. Они дуют на запад по направлению к морю Баффина и на восток в Атлантику севернее о. Исландия. Именно в этом направлении стоковые ветры с Гренландских ледников и воздействуют на Гольфстрим, отжимая его к берегам Скандинавии (рис. 20).

Как показывает практика, очень холодные стоковые ветры с Антарктического ледового щита влияют на развитие и устойчивость морского ледового покрова у его берегов, проникая в сторону океана на 10 км и более, где встречаются с ветрами над Антарктическим циркумполярным течением (рис. 21, а, б). Стоковые ветры в Арктике и Антарктике определяют динамику прибрежных льдов, площади которых то возрастают, то уменьшаются и носят как сезонный характер, так и вековой. При этом изменение площади морских льдов в полярных областях происходит попеременно, т. е. увеличение площади льдов в Арктике сочетается с их уменьшением в Антарктике и наоборот.

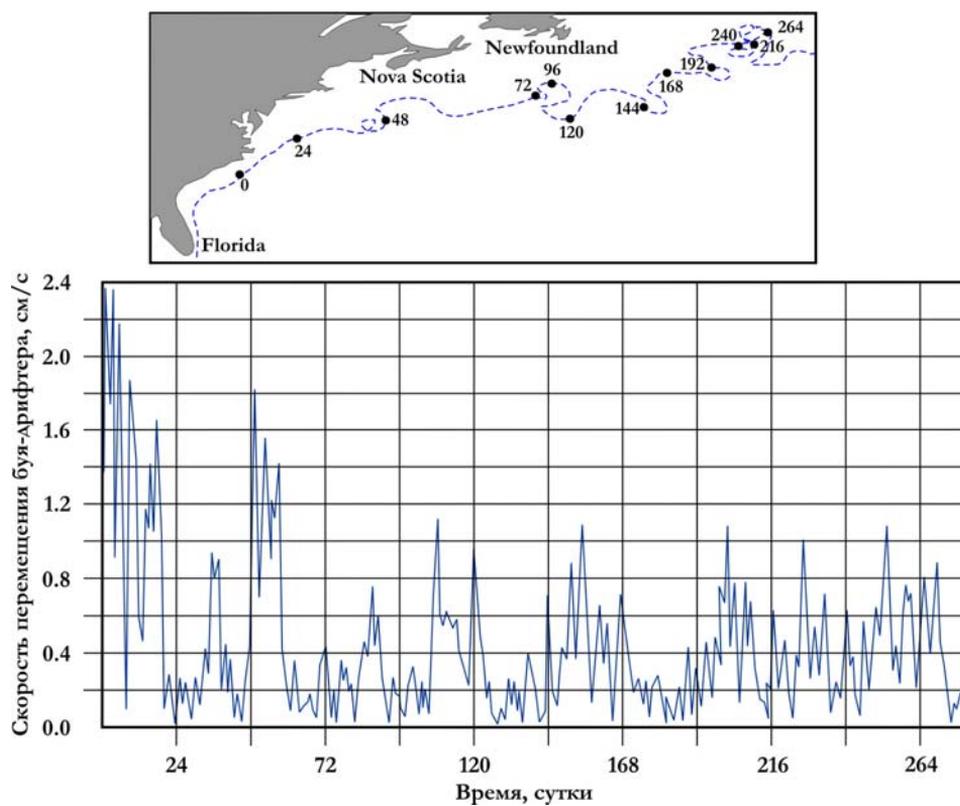


Рис. 18. Вариации скорости течения Гольфстрима [Бондаренко, 2013]

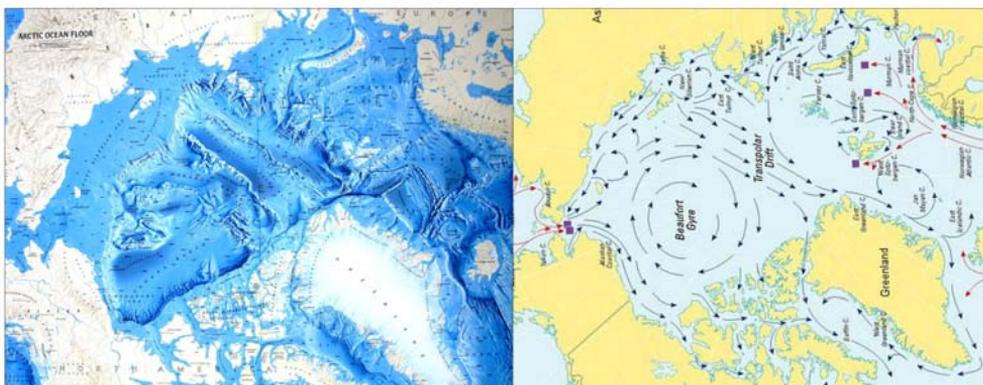


Рис. 19. Рельеф и морские течения в Арктическом бассейне. Холодные (синие стрелки) и теплые (красные стрелки) течения [Рельеф дна Арктического бассейна]

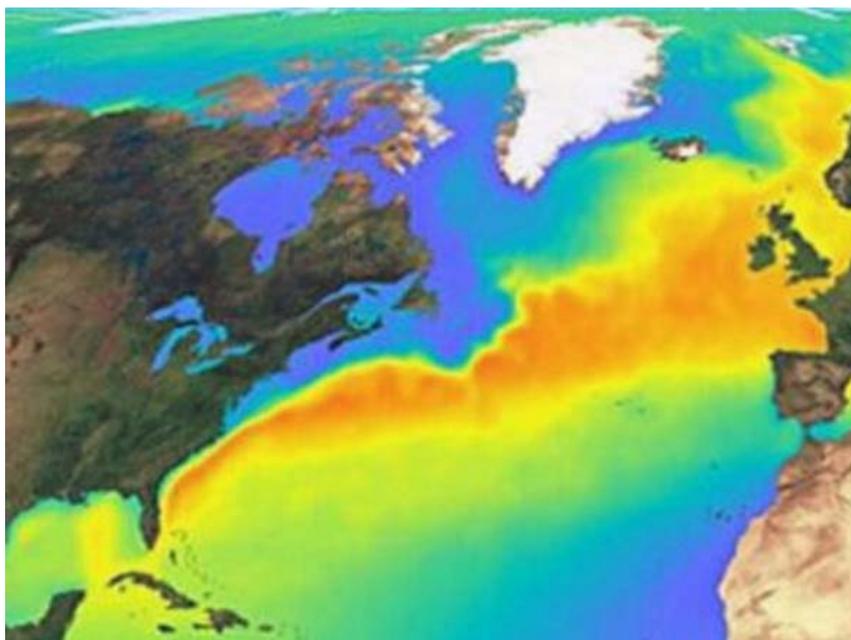


Рис. 20. Стоковые ветры с ледового щита Гренландии существенно влияют на параметры Гольфстрима, отжимая его к берегам Европы

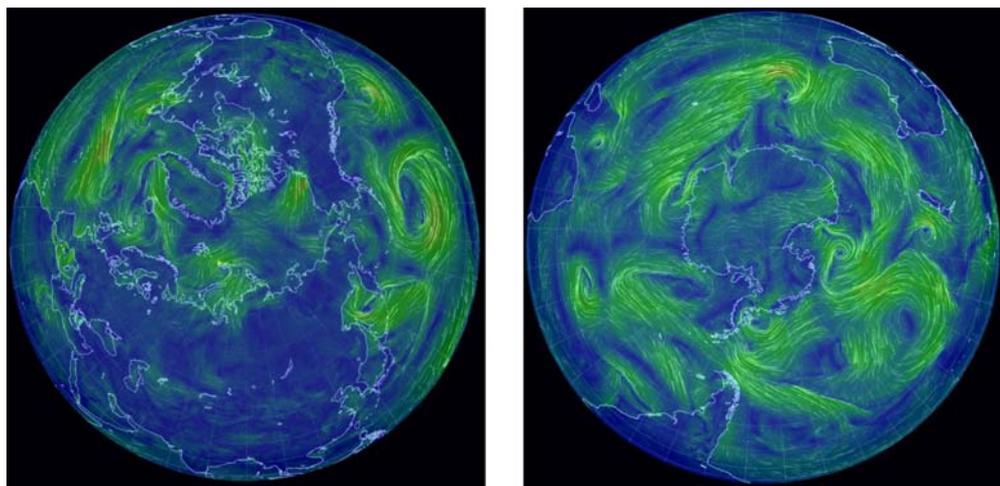


Рис. 21. Воздушные потоки в Арктике (А) [http://www.t-z-n.ru/preocean/int_kartoteka.html] и Антарктике (В) [Воздушные потоки ...]

Важно то, что вариации солнечной активности опосредованно, через атмосферную и гидросферную циркуляцию, определяют изменения размеров ледового покрытия в полярных областях Арктики и Антарктики. Именно количество атмосферных осадков и температурный режим атмосферы регулируют объемы накапливания и таянья ледниковых щитов. Справедливости ради отметим, что идея солнечного влияния на льдообразование в полярных

областях была высказана в начале XX в. Л. Мекингом [Meking, 1918]. Он отметил, что количество льда в морях варьирует, и что это вызвано вариациями солнечной активности – периоды максимальной солнечной активности способствуют уменьшению количества льда, а периоды минимальной – его увеличению.

Предположения Л. Мекинга иллюстрирует рис. 22 в интерпретации З. М. Гудковича и его коллег [Изменения морского ледяного покрова ... , 2008]. Под ледовитостью на рисунке следует понимать процент покрытия льдом акваторий морей. Однако рассмотренный интервал семи прошедших десятилетий в целом короток для серьезных выводов и прогнозов.

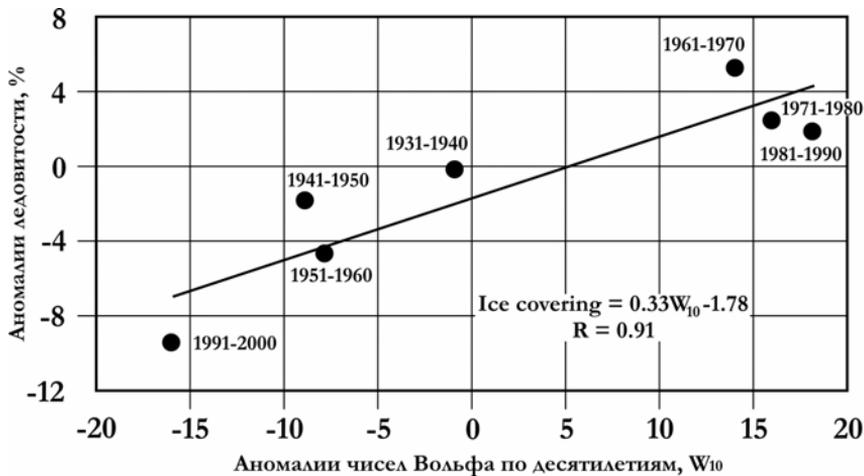


Рис. 22. Связь средних за 10-летия аномалий суммарной ледовитости арктических морей со средними за 10-летия аномалиями чисел Вольфа W_{10} [Изменения морского ледяного покрова ... , 2008]

Сравнение вариаций температуры Гольфстрима с вариациями температуры воздуха над поверхностью ледника Гренландии с 1840 по 2007 г. [Greenland ice sheet surface ... , 2012] (рис. 23) показывает, что они происходят почти синхронно. На фоне вариаций солнечной активности наблюдается то, что, несмотря на несколько повышенную инсоляцию поверхности ледника до 1925 г., его температура была устойчиво низкой, а затем пики потеплений начали совпадать с минимумами солнечной активности, т. е. произошла своеобразная инверсия. Возможно, это связано с одновременно возникающими температурными аномалиями Гольфстрима и атмосферной циркуляции как в Северной Атлантике, Арктике, так и над Гренландским ледовым щитом.

Кластер-анализ (рис. 24) показал очень тесное согласие температур воздуха над поверхностью Гренландского ледника $\Delta T^{\circ}\text{C}_{\text{Greenland}}$ и Гольфстрима $\Delta T^{\circ}\text{C}_{\text{Gulfstream}}$. Одновременно выяснилось, что турбулентность атмосферы за счет циркумполярных и стоковых ветров тоже оказывает существенное влияние на погодно-климатическую обстановку в Западной Европе.

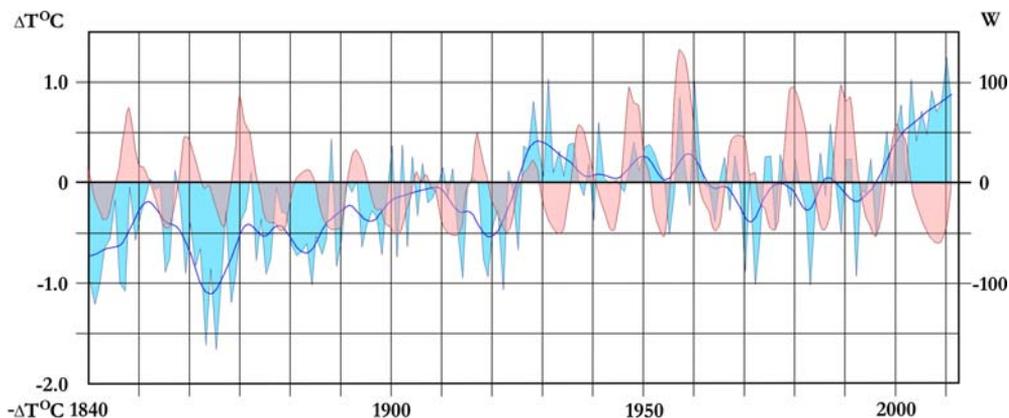


Рис. 23. Вариации температуры воздуха над поверхностью ледника Гренландии с 1840 по 2007 г. [Greenland ice sheet surface ... , 2012]

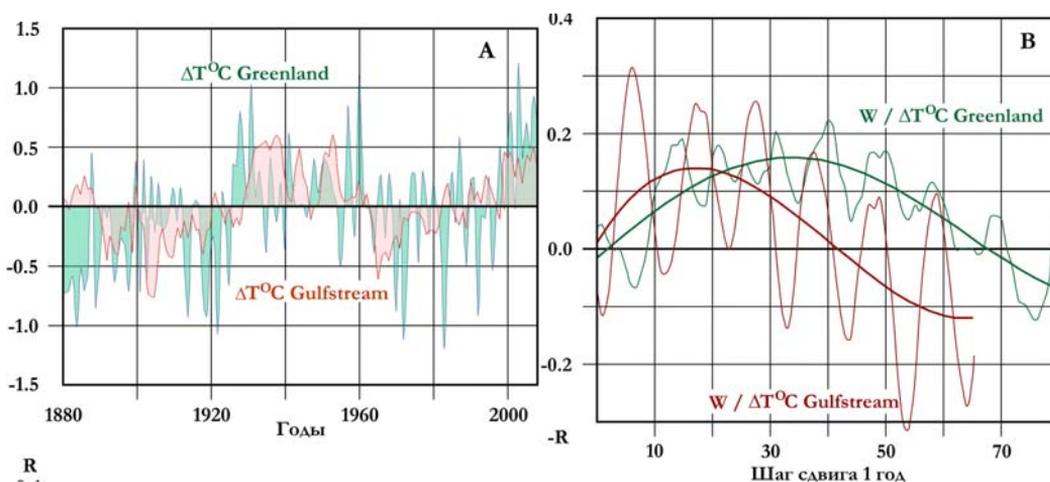


Рис. 24. Совместные временные вариации приращений температуры воздуха над Гренландским ледниковым щитом и струйным океанским течением Гольфстрим (A) и результат кросс-корреляционного анализа этих же параметров в связи с солнечной активностью (B)

Спутниковый мониторинг площади ледового покрова Арктики в 1978–2013 гг. показывал, что зимой и летом на протяжении прошедших 33–35 лет площадь ледового покрова стабильно уменьшалась в соответствии с общим снижением солнечной активности (рис. 26).

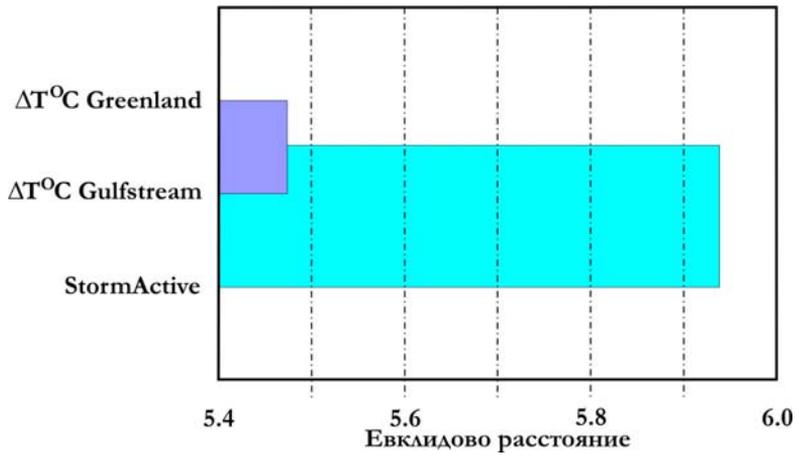


Рис. 25. Результат кластер-анализа параметров приращения температуры Гольфстрима, показателя турбулентности атмосферы и приращения температуры воздуха над поверхностью гренландского ледового покрова

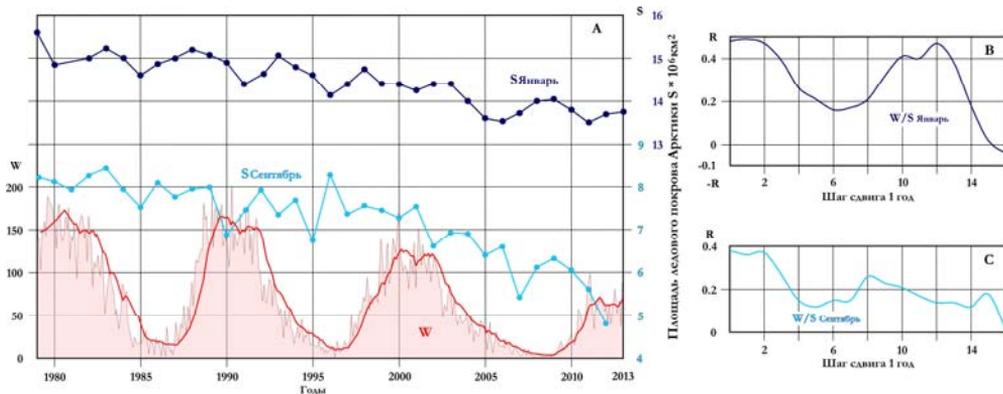


Рис. 26. А: вариации площади ледового покрова в Арктике с 1978 по 2013 г. на фоне вариаций солнечной активности; В и С – кривые, результат кросс-корреляционного анализа между площадями ледового покрова в январе и сентябре и солнечной активностью

Расширим наши представления о ледовом режиме Арктики за счет исторических данных (рис. 27 и 28). Видно, что процесс увеличения или сокращения площади ледового покрова в Арктике в должной мере контролируется вариациями солнечной активности. Сведения о динамике ледового режима базируются на исторических записях судовых журналов мореходов, курсировавших в Гренландском и Баренцевом морях между островными архипелагами Свальбард и Земля Франца Иосифа [Two ice-core ..., 2005] с 1580-х до конца 1990-х гг. Рисунок 27 иллюстрирует современное географическое положение кромки морских льдов в Арктике, где определялось широтное ее положение у о-вов Свальбард и Земля Франца-Иосифа (ЗФИ).

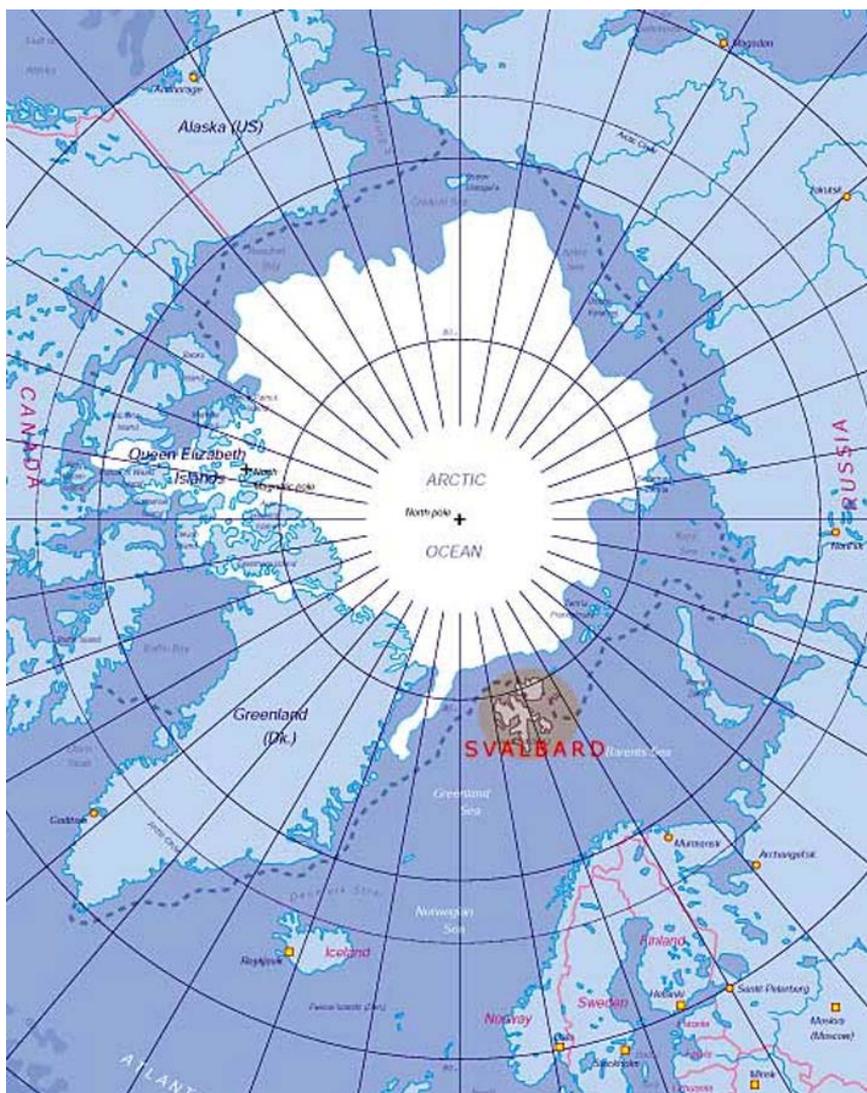


Рис. 27. Географическое положение рассматриваемых объектов, синий пункт – современное положение кромки морских льдов [http://www.instructables.com/ community/The-Land-Where-Death-is-Illegal/]

На рис. 27 показано реальное положение кромки льдов в историческом прошлом. Очевидно, что проникновение льдов в более низкие широты свидетельствует о похолоданиях в Арктике, а отступление в высокие широты – о потеплениях. Показаны также традиционные временные рамки известных гранд-минимумов солнечной активности. Видно, что сами минимумы были неоднородными по сочетанию теплых и холодных годов, а температурные аномалии атмосферы и гидросферы выходят за традиционные временные рамки гранд-минимумов, что отражает некоторую консервативность течения процессов относительно друг друга.

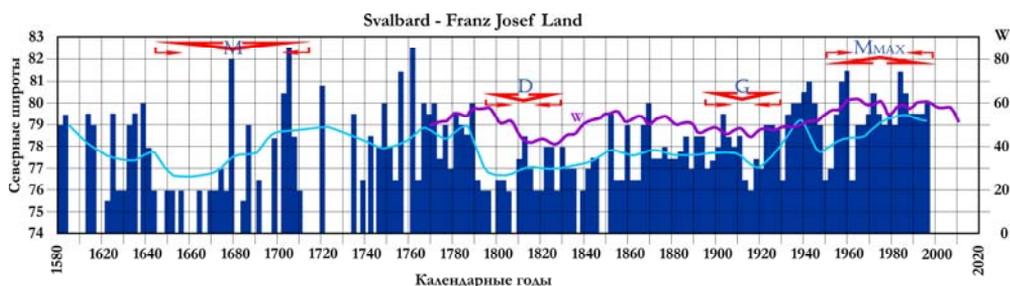


Рис. 28. Вариации по времени широтного положения кромки ледового покрова в районе о-вов Шпицберген и Земля Франца-Иосифа в 1580–2000 гг. [Two ice-core ... , 2005]; голубая кривая – сглаживающая для гистограммы; фиолетовая кривая – вариации чисел W, сглаженные 20-летним окном. Красные стрелки над кривыми отражают временное положение глобальных солнечных минимумов: М – Маундера, D – Дальтона, G – Гневышева и Mmax – современный максимум солнечной активности

Существенное влияние на ледовую обстановку в Арктике оказывает изменение индекса Северо-Атлантической осцилляции (АМО), который определяет перепад атмосферного давления и температуры воздуха на обсерваториях на о. Исландия и в Азорско-Гибралтарском регионе. На рис. 29 видно, что значения АМО-индексов становятся отрицательными при длительном понижении солнечной активности и, наоборот, положительными с ее повышением, таким образом контролируя потепления и похолодания в Европе.

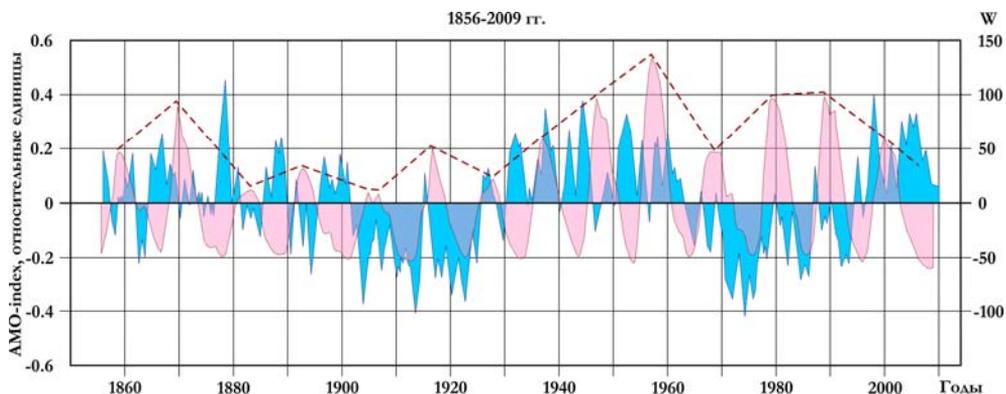


Рис. 29. Вариации АМО-индексов в 1856–2009 гг. на фоне вариаций солнечной активности [<http://www.theclimatechangeclearinghouse.org/Climate-ChangeScience/default.asp>]. Пунктирная линия соединяет максимумы активности в 11-летнем цикле Швабе – Вольфа

На рис. 30 приведена кривая восстановленных вариаций ледового покрова Арктики за последние 1450 лет. Однако в первоисточнике [Arctic Sea Ice ...] список опорных публикаций отсутствуют, и потому остается тайной, каким образом выполнены реконструкции. Для наглядности красными вставками мы поместили временные интервалы известных гранд-минимумов за прошед-

шие 1 тыс. лет. Неустойчивая ситуация с площадями ледового покрова наблюдалась в VII в. Затем процесс льдообразования стабилизировался, и минимум Оорта, вероятно, в силу своей краткости, на кривой не обозначился. Несколько повышенные площади ледового покрова наблюдались в XIII–XIV вв. и сменились резким уменьшением ледовитости в преддверии минимума Шпёрера. Затем последовало длительное и глубокое уменьшение ледовитости в начале XVI в., продлившееся вплоть до середины XVIII в. Этот интервал времени совпадает с гранд-минимумом Маундера, считающимся первопричиной возникновения Малого ледникового периода, с чем в противоречие вступает сокращение ледового покрова Арктики. Такое могло быть только на фоне относительного потепления. С середины XVIII в. наблюдалось постепенное разрастание площади ледового покрова Арктики, продлившееся до первой половины XX в. Для того чтобы проверить достоверность кривой, мы привлекли материалы древесно-кольцевых хронологий для территории Западной Сибири (рис. 31).

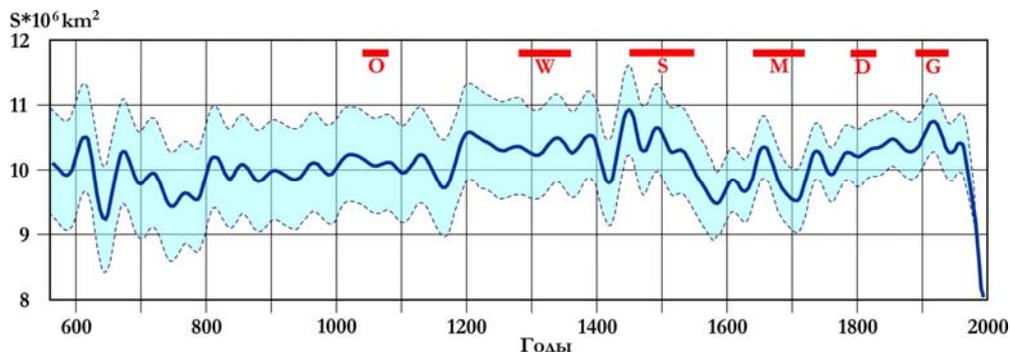


Рис. 30. Восстановленные вариации площади ледового покрова Арктики в течение последних 1450 лет [Arctic Sea Ice ...]. Красным помечены долговременные минимумы солнечной активности: O – Оорта, W – Вольфа, S – Шпёрера, M – Маундера, D – Дальтона и G – Гневшыева

Из сравнения рис. 30 с древесно-кольцевой хронологией п-ова Ямал (рис. 31) следует, что условия комфортности произрастания древостоев, чутко реагирующих на потепление-похолодание и влажность среды, были более контрастными, чем те, что мы наблюдали в вариациях площади ледового покрова Арктики. Древостои четко указывают на периоды длительных похолоданий, по продолжительности явно превышающие длительность гранд-минимумов. Кроме того, древесно-кольцевые хронологии позволяют значительно детализировать погодно-климатические условия среды обитания древостоев.

Отсюда мы констатируем, что термин «Малый ледниковый период» применим исключительно для Западной Европы. Именно там наблюдалась отчетливая контрастность погодно-климатических условий. Само по себе наступление такого масштабного по продолжительности похолодания было обусловлено специфическим развитием атмосферно-гидросферных процессов, лишь по времени совпавшими с Маундеровским гранд-минимумом.

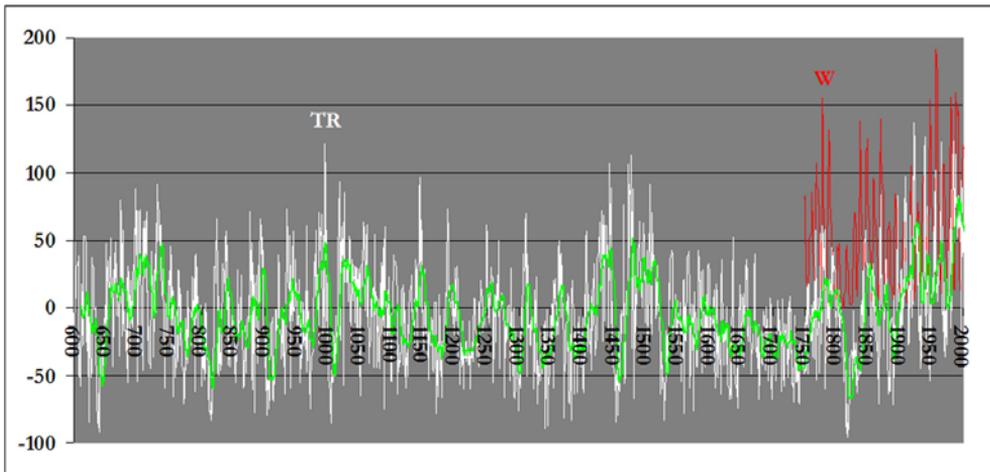


Рис. 31. Древесно-кольцевая хронология 600–2005 гг. с п-ова Ямал, Западная Сибирь [Гелиогеодинамика ... , 2012]. Вертикальная ось – TR-индексы; горизонтальная – годы

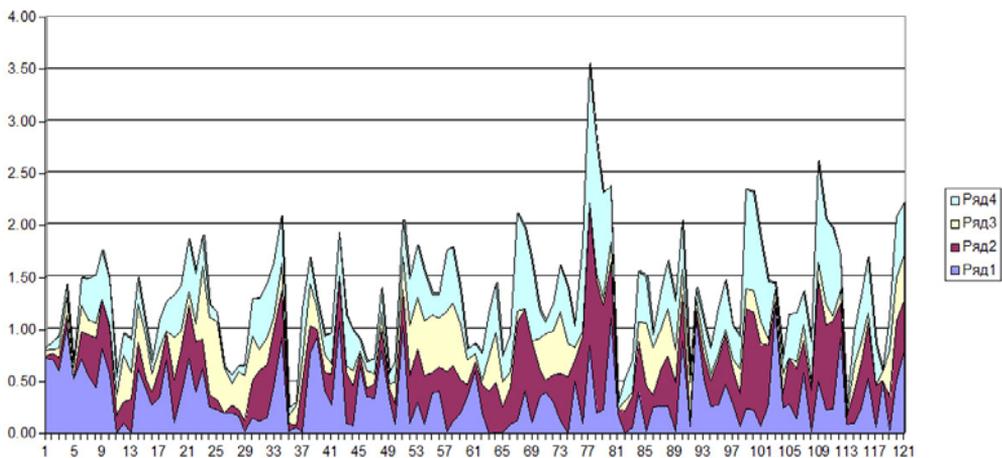


Рис. 32. Временные соотношения между параметрами климата Северной Атлантики: солнечной активности (ряд 4), приращения температуры Гольфстрима (ряд 3), показателя турбулентности атмосферы (ряд 2) и приращения температуры воздуха над поверхностью гренландского ледового покрова (ряд 1). По оси абсцисс отложены номера годов с 1840 по 1960.

Поскольку в возникновении Малого ледникового периода повинен комплекс атмосферно-гидросферных процессов, контролируемых солнечной активностью, то интересно сопоставить совместные временные вариации их параметров (рис. 32). Из рисунка следует, что все ряды реагируют на изменение солнечной активности почти синхронно, а это в свою очередь определяет устойчиво циклический ход изменения комплекса природных процессов.

Заключение

На основе сказанного выше можно сделать следующие выводы.

Наступление такого масштабного, но по времени изменчивого похолодания, как Малый ледниковый период, было обусловлено специфическим развитием комплекса атмосферно-гидросферных процессов, развивающихся под непосредственным влиянием долговременных вариаций солнечной активности, среди которых гранд-минимум Маундера являлся лишь отдельным эпизодом.

Относительное удлинение по времени гранд-минимумов и укорочение гранд-максимумов привело к затяжному снижению инсоляции земной поверхности, возрастанию альбедо в зимнее время из-за увеличения площади, покрытой снегами, и закономерному длительному понижению средних температур воздуха приземного слоя атмосферы.

Термин «Малый ледниковый период» следует использовать для территории Западной Европы, а наступление масштабного похолодания было обусловлено спецификой атмосферно-гидросферных процессов. В целом, гранд-минимумы солнечной активности характеризуются контрастностью зимних погод.

В целом гранд-минимумы солнечной активности характеризуются контрастностью зимних погод.

Наступление Малого ледникового периода в Европе является результатом не только динамики теплоотдачи Гольфстрима, но на поздних этапах и недостатком инсоляции океанской и земной поверхности в период Маундеровского гранд-минимума солнечной активности, заметно превышая его длительность.

Список литературы

Бондаренко А. Л. О природе течений Мирового океана [Электронный ресурс] / А. Л. Бондаренко. – 2013. – URL: <http://www.randewy.ru/gml/bondar.html>.

Вариации температуры Гольфстрима [Электронный ресурс] // Climate Explorer. – URL: http://climexp.knmi.nl/selectfield_obs.cgi?someone@somewhere

Воздушные потоки в Арктике и Антарктике [Электронный ресурс] // Earth.nullschool.net. – 2014. – URL: <http://earth.nullschool.net/#current/wind/isobaric/1000hPa/orthographic=-290.47,2.37,406>

Гелиогеодинамика. Природные аспекты глобальных солнечных минимумов / К. Г. Леви, Н. В. Задонина, С. А. Язев, В. И. Воронин, М. М. Наурызбаев, Р. М. Хантемиров. – Иркутск : Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2012. – Т. 1, кн. 1. – 511 с.

Изменения морского ледяного покрова и других составляющих климатической системы в Арктике и Антарктике в связи с эволюцией полярных вихрей / З. М. Гудкович, В. П. Карклин, Е. Г. Ковалев, В. М. Смоляницкий, И. Е. Фролов // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2008. – № 1 (78). – С. 48–58.

Константиновская Л. В. Солнечная активность (таблицы Геомагнитная активность (магнитные бури), вариации Аа-индекса с 1868 по 2006 гг.) [Электронный ресурс] / Л. В. Константиновская. – 2009. – URL: <http://www.astronom2000.info/%D1%81%D1%81%D1%8B%D0%BB%D0%BA%D0%B8>.

Леви К. Г. Периодичность вертикальных и горизонтальных движений и внутриконтинентальный орогенез Евразии / К. Г. Леви, С. А. Борняков // Внутриконтинентальные горные области: геологические и геофизические аспекты. – Иркутск, 1987. – С. 60–63.

Макарова Е. А. Поток солнечного излучения / Е. А. Макарова, А. В. Харитонов, Т. В. Казачевская. – М. : Наука, 1991. – 396 с.

Нестеров Е. С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан / Е. С. Нестеров. – М. : Триада лтд, 2013. – 144 с.

Распопов О. М. 200-летние вариации космических лучей, модулированных солнечной активностью, и их климатический отклик [Электронный ресурс] / О. М. Распопов, В. А. Дергачев // Материалы 29-й Всерос. конф. по косм. лучам. – 2006. – URL: <http://www.yshared.ru/slide/331797>.

Североатлантическая осцилляция [Электронный ресурс]. – URL: http://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Atlantic_Multidecadal_Oscillation?uselang=ru#mediaviewer/File:Atlantic_Multidecadal_Oscillation.svg

Современный снежный покров – январь в Северном полушарии [Электронный ресурс]. – URL: <http://pixabay.com/en/earth-map-winter-january-11047>.

Колебания солнечной активности – основной климатообразующий фактор в масштабе тысячелетия [Электронный ресурс] / С. В. Хорозов, И. И. Будовый, В. А. Медведев, В. С. Белоголов. – URL: www.irc.phys.spbu.ru/msar04/climate.doc

Чумичёв С. А. Климат голоцена по естественнонаучным данным и его отражение в исторических хрониках: корни системных противоречий [Электронный ресурс] / С. А. Чумичёв. – 2013. – URL: <http://kurs.znate.ru/docs/index-143808.html>

Alley R. B. The Younger Dryas cold interval as viewed from central Greenland / R. B. Alley // *Quaternary Science Reviews*. – 2000. – Vol. 19, Is. 1–5. – P. 213–226.

Greenland ice sheet surface air temperature variability: 1840–2007 / J. E. Box, L. Yang, D. H. Brownich, L.-S. Bay // *Journal of Climate*. – 2012. – Vol. 22 (14). – P. 4029–4049.

Delaygue G. An Antarctic view of Beryllium-10 and solar activity for the past millennium / G. Delaygue, E. Bard // *Climate Dynamics*. – 2011. – Vol. 36, Is. 11–12. – P. 2201–2218.

Do the precession of the equinoxes, and the Earth's orbital eccentricity affect weather? [Electronic resource]. – URL: <http://www.astronomycave.net/qadir/q2389.html>

Eddy J. A. The Case of the Missing Sunspots / J. A. Eddy // *Scientific American*. – 1977. – Vol. 236, N 5. – P. 80–88.

Eddy J. A. The Maunder Minimum / J. A. Eddy // *Science*. – 1976. – Vol. 192 (4245). – P. 1189–202

Meking L. Nordamerika, Nordeuropa und der Golfstrom in der elfjarigen Klimaperiode A.n.n.d. Hydrographil usw / L. Meking. – 1918.

The recent increase in Atlantic hurricane activity: Causes and implications / S. B. Goldenberg, C. W. Landsea, A. M. Mestas-Núñez, W. M. Gray // *Science*. – 2001. – Vol. 293. – P. 474–479.

Two ice-core $d^{18}O$ records from Svalbard illustrating climate and sea-ice variability over the last 400 years / E. Isaksson, J. Kohler, V. Pohjola, J. Moore, M. Igarashi, L. Karlo, T. Martma, H. Meijer, H. Motoyama, R. Vaikma, R. S. W. van de Wal // *The Holocene*. – 2005. – Vol. 15/4 – P. 501–509.

National Climatic Data Center, NESDIS, NOAA, U.S. Department of Commerce [Electronic resource]. – URL: <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/paleo.html>

Schove D. J. The sunspot cycle, 649 BC to AD 2000 / D. J. Schove // *Terr. Magnet. & Atmos. Electr.* – 1955. – Vol. 60, N 2. – P. 127–146.

The Sun and Climate [Electronic resource] / USGS. – 2000. – URL: <http://pubs.usgs.gov/fs/fs-0095-00/fs-0095-00.pdf>

What is Climate Change? [Electronic resource]. – 2014. – URL: <http://www.theclimatechangeclearinghouse.org/ClimateChangeScience/default.asp>

Little Glacial Age. Part 2. Heliophysical and Climatic Aspects

K. G. Levi, V. I. Voronin, N. V. Zadonina, S. A. Yazev

Abstract. There is presented the analysis of natural and climatic environments because of changing of heliophysical parameters that were established in Europe and known as the Little Glacial Age. Previously it was thought that its appearance is connected with Grand Maunder minimum of solar activity in the period 1645–1715. However, a comprehensive analysis of natural and climatic environments showed that this phenomenon was more characteristic of Europe than other areas and was due to complex reasons. Such large-scale offensive, but temporal variability of cooling as the Little Glacial Age was caused by the development of a specific set of atmospheric and hydrosphere processes developed under the direct influence of long-term variations in solar activity, including Maunder grand-minimum was only a single episode. Correct to call this period the «Little Glacial Age in Europe», which although wore a global character, but more clearly manifested in the territory is Western Europe, where there is a clear contrast climatic conditions. The advent of large-scale cooling was caused by the development of specific atmospheric and hydrosphere processes that were coincided with the Maunder grand-minimum just in time.

Keywords: Little Glacial Age, solar activity, Gulfstream, dendrochronology, "fierce" winters, extreme summers, the ice cover of the Arctic

Леви Кирилл Георгиевич

доктор геолого-минералогических наук,
профессор, зам. директора по научной
работе
Институт земной коры СО РАН
664033, Россия, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 128
e-mail: levi@crust.irk.ru

Levi Kirill Georgievich

Doctor of Sciences (Geology and Mineralogy), Professor,
Deputy Director for Science
Institute of the Earth's Crust, SB RAS
128, Lermontov st., Irkutsk, Russia, 664033
e-mail: levi@crust.irk.ru

Воронин Виктор Иванович

доктор биологических наук
зам. директора по научной работе
Сибирский институт физиологии
и биохимии растений СО РАН
664033, Россия, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 132
e-mail: bioin@sifibr.irk.ru

Voronin Victor Ivanovich

Doctor of Sciences (Biology),
Deputy Director for Science
Siberian Institute of Plant Physiology and
Biochemistry SB RAS
132, Lermontov st., Irkutsk, Russia, 664033
e-mail: bioin@sifibr.irk.ru

Задонина Наталья Витальевна

кандидат геолого-минералогических наук,
доцент
Национальный исследовательский
Иркутский государственный
технический университет
664033, Россия, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 83
e-mail: nzadonina@yandex.ru

Zadonina Natalia Vitalievna

Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Associate Professor
National Research Irkutsk State Technical
University
83, Lermontov st., Irkutsk, Russia, 664033
e-mail: nzadonina@yandex.ru

Язев Сергей Артурович

доктор физико-математических наук,
доцент, директор Астрономической
обсерватории
Иркутский государственный университет
664009, Россия, г. Иркутск,
ул. К. Маркса, 1
e-mail: uustar@star.isu.ru

Yazev Sergey Arkturovich

Doctor of Sciences (Physic and
Mathematic), Associate Professor,
Director of the Astronomical Observatory
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, Russia, 664009
e-mail: uustar@star.isu.ru