

Связь изменений климата с геомагнитным полем.

1. Пространственно-временная структура магнитного поля Земли и климата в XX в.

© В.Г. Бахмутов¹, В.Ф. Мартазинова², Н.А. Килифарска³,
Г.В. Мельник¹, Е.К. Иванова², 2014

¹Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

²Украинский гидрометеорологический институт НАН Украины и
Государственной службы Украины по чрезвычайным ситуациям,
Киев, Украина

³Национальный институт геофизики, геодезии и географии,
Болгарская академия наук, София, Болгария

Поступила 18 сентября 2013 г.

Представлено членом редколлегии В. Н. Шуманом

Аналіз головного геомагнітного поля (за моделлю IGRF) та кліматичних параметрів — приземної температури повітря і приземного тиску, дав змогу простежити їх глобальні зміни протягом XX ст. і виявити між ними просторово-часовий зв'язок. Проаналізовано інтегральні характеристики геомагнітного поля, полів приземної температури і тиску, розраховані за єдиною методикою, і динаміку цих полів для широтного поясу 40—70° пн. ш. У результаті виявлено регіональні та глобальні особливості, визначено відповідні загальні характеристики. У просторово-часовій структурі магнітного поля XX ст. виділено три інтервали, що характеризуються різною поведінкою геомагнітного поля. Вони узгоджуються з трьома періодами зміни глобальної температури: первинне глобальне потепління (1911—1943), період стабілізації — з кінця 1940-х до початку—середини 1970-х років, вторинне глобальне потепління — з початку—середини 1970-х років до теперішнього часу. Візуально місце розташування основних структур геомагнітного поля, баричного поля і поля температур у Північній півкулі протягом XX ст. досить добре збігається. Високий коефіцієнт подібності інтегральних столітніх кривих модуля повного вектора геомагнітного поля F і приземної температури $T(R_{FT}) = -0,83$ досить несподіваний. Враховуючи методику, за якою був отриманий і оброблений фактичний матеріал, важко уявити, що така кореляція є випадковою. Якщо причинно-наслідковий зв'язок існує, то очевидно, що геомагнітне поле якимось чином впливає на температуру (або тиск), але не навпаки. Механізми, за допомогою яких геомагнітне поле може впливати на клімат на різних часових масштабах, мало вивчені і є основною проблемою. Головне магнітне поле Землі розглянуто як перша головна ланка причинно-наслідкових зв'язків ланцюжка магнітне поле — клімат. Стисло викладено сучасні уявлення про можливі механізми впливу сонячної активності і геомагнітного поля на клімат. Зазначено, що основна роль у них належить галактичним космічним променям. Представлений матеріал лежить в основі другої частини статті, де простежено ланцюжок причинно-наслідкових зв'язків варіацій магнітного поля Землі, галактичних космічних променів, варіацій вмісту озону і кількості водяної пари у верхній тропосфері / нижній стратосфері, що в підсумку призводить до зміни радіаційного балансу нашої планети і, як наслідок, до змін приземної температури та клімату.

Ключові слова: геомагнітне поле, зміни клімату, приземна температура і атмосферний тиск.

Geomagnetic field and climate variability.

1. Spatial-temporal distribution of geomagnetic field and climatic parameters during XX century

© V. G. Bakmutov, V. F. Martazinova, N. A. Kilifarska,
G. V. Melnyk, E. K. Ivanova, 2014

Analysis of main geomagnetic field (from IGRF model) and climatic parameters (near surface air temperature and surface pressure) allows us to determine their variability and spatial-temporal relations between them during the 20th. Integral characteristics and dynamics of the above parameters in latitudinal band 40—70 °N have been investigated, applying one and the same approach. This gives us the possibility to reveal their global and regional characteristics — the differences and similarities between them. Three distinct periods of the spatial-temporal distribution of geomagnetic field intensity have been determined, that could be connected to corresponding periods of mean near surface air temperature evolution during the 20th century: initial global warming (1911—1943); stabilization (end of 1940 s — middle 1970 s); secondary global warming (middle of 1970 s — 2000 s). There is a good correspondence between geomagnetic field, near surface air temperature and pressure spatial distributions during the 20th century. The high coefficient of similarity between integral spatial distributions of geomagnetic field intensity F and surface air temperature $T(R_{FT}) = -0,83$ is quite unexpected. It indicates that relations between them could hardly be a random connection. If there is a causal relation between them, it obviously should be in the direction: geomagnetic field influence on the temperature and / or surface pressure. The main problem in this case is that the mechanisms of magnetic field influence on climatic parameters are less investigated and poorly understood. In this paper geomagnetic field is considered to be a first element of the causal chain of processes relating it with Earth's climate. A brief review of recent understanding of solar — geomagnetic field influence on climate shows that the main role in this process is played by galactic cosmic rays. Results presented here are basement for the second part of this paper, where the causal link of the processes connecting geomagnetic field with galactic cosmic rays, ozone and water vapour near the tropopause (with their influence on the radiation balance of the planet and consequently on climate) is thoroughly analysed.

Key words: geomagnetic field, climate changes, surface temperature and atmosphere pressure.

Введение. О выявлении связи некоторых климатических параметров с изменениями магнитного поля Земли (МПЗ) сообщают многие авторы. При этом приводится ряд аргументов, что вариации магнитного поля различных источников влияют на климат на разных временных масштабах (см., например, [Doake, 1978; Courtillot et al., 1982; Bucha, 1988a, b; Bucha, Bucha, 1998; Sharma, 2002; Gallet et al., 2003, 2005; Le Mouél et al., 2005; Vieira, da Silva, 2006; Бахмутов, 2006; Courtillot et al., 2007; Бахмутов и др., 2011]). На первый взгляд физически такая связь — совершенно неожиданна и необъяснима, поскольку нижняя атмосфера является электрически нейтральной средой и, следовательно, независимой от МПЗ. С другой стороны, вопрос остается достаточно спорным, поскольку есть много данных, свидетельствующих как в пользу доказательств таких связей, так и их опровержений, что вызывает бурные дискуссии (см., например,

[Мартазинова, Бахмутов, 2006; Courtillot et al., 2007, 2008; Bard, Delaygue, 2007], т. е. основными проблемами являются как установление достоверных корреляционных связей, так и возможный механизм такого влияния.

Следует отметить, что речь идет о связи изменений климата с вариациями МПЗ, обусловленными разными источниками — внутренними (ядро Земли) и внешними (магнитосфера и ионосфера), которые имеют принципиально разную природу, характеризуются разным частотным диапазоном и информацией о которых получают с привлечением разных методов. Такая связь рассматривается как в масштабах сотен, тысяч и миллионов лет с привлечением палеоданных, так и за период прямых инструментальных наблюдений за изменениями климата, солнечной и геомагнитной активности и других геофизических параметров.

Принято считать, что вариации солнечной радиации, содержания водяного пара и диоксида углерода в атмосфере (а также аэрозолей, связанных с вулканической деятельностью) являются основными потенциальными агентами изменений климата на разных временных масштабах. Что касается соответствующего наблюдаемого параметра, характеризующего климатические изменения, среди прочих индикаторов нами выбран наиболее простой и доступный — температура приземного воздуха. Кроме того, уделено внимание изучению динамики и глобальной атмосферной циркуляции.

Цель работы — определение временных и пространственных соотношений между МПЗ и другими параметрами, воздействующими на климат, а также установление причинно-следственной связи между ними. Первая часть статьи посвящена анализу структуры и динамики главного МПЗ, атмосферной циркуляции и глобальным изменениям климата в XX в. в средних широтах Северного полушария и является продолжением статьи [Бахмутов и др., 2011]. Во второй части статьи предлагается новый механизм, объясняющий воздействие геомагнитного поля на климат через процессы в верхней тропосфере — нижней астеносфере [Kilifarska, 2012; Kilifarska et al., 2012]. Прослеже-

на цепочка причинно-следственных связей галактических космических лучей, МПЗ, вариаций озона и количества водяного пара в верхней тропосфере / нижней стратосфере, что в итоге приводит к изменению радиационного баланса нашей планеты и, как следствие, к изменениям климата.

Радиационный баланс, солнечно-земные связи и климат. Баланс температуры на поверхности Земли связан с количеством излучения, поступающего на Землю от Солнца (рис. 1). При этом большая часть энергии поступает в виде электромагнитного излучения, 99,9 % сосредоточено в инфракрасной и ультрафиолетовой областях солнечного спектра. Среднее количество энергии, поступающей в верхнюю часть атмосферы, составляет около 342 Вт/м^2 . Около 31 % энергии, отражающейся от облаков, аэрозолей, атмосферы и от поверхности Земли (соответственно около 77 и 30 Вт/м^2), определяет альбедо Земли. Из оставшихся 235 Вт/м^2 в атмосфере поглощается 67 Вт/м^2 , а 168 Вт/м^2 поглощаются, достигнув поверхности Земли. При таком балансе средняя температура на Земле должна быть около -19°C , что характерно для высоты около 5 км в средних широтах, а не $+14^\circ\text{C}$. Благодаря тому, что около 390 Вт/м^2 излучается поверхностью Земли в



Рис. 1. Среднегодовой глобальный энергетический баланс Земли, Вт/м^2 [Kiehl, Trenberth, 1997].

виде инфракрасного излучения, из которых 155 Вт/м^2 вновь поступают к земной поверхности в результате известного "парникового эффекта", в суммарном энергетическом балансе энергии 324 Вт/м^2 достаточно для поддержания приемлемой для жизни на Земле температуры. К основным парниковым газам относятся водяной пар (H_2O), диоксид углерода (CO_2) и метан (CH_4). Изменения солнечной постоянной (среднегодовое значение последней варьирует не более чем на 0,075 %), содержания водяного пара, диоксида углерода и аэрозолей считаются определяющими агентами в изменениях климата на разных временных шкалах.

В общей схеме солнечно-земных связей механизмы передачи энергии и процессы в цепочке Солнце — магнитосфера — ионосфера изучены достаточно хорошо. В последние два десятилетия в исследованиях влияния Солнца на изменения глобальной температуры достигнут значительный прогресс, есть достаточно доказательств, свидетельствующих о влиянии вариаций солнечной энергии на изменение климата (см., например, [Svensmark, Friis-Christensen, 1997 и ссылки в ней; Douglass, Clader, 2002]). Многие исследования указывают на долгосрочный аспект солнечно-климатических взаимодействий [Reid, 1987, 1991, 2000; White et al., 1997].

При кажущейся очевидности влияния Солнца на атмосферу Земли, рассматривая разные варианты возможных механизмов, исследователи сталкиваются с принципиальными трудностями: 1) общий поток солнечной энергии, приходящий к Земле, считается постоянным; различие для максимума и минимума циклов солнечной активности менее 0,1 %; 2) энергия корпускулярной части общего потока солнечной энергии чрезвычайно мала; полная энергия солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, достигающая границы верхней атмосферы за единицу времени с учетом экранирующего действия геомагнитного поля, составляет менее одной миллионной общего потока солнечной энергии; 3) даже эта незначительная доля общего потока солнечной энергии, приходящая к Земле, не доходит до поверхности, поглощаясь в верхней атмосфере; 4) отсутствие очевидных механизмов для передачи энергии солнечного излучения в нижнюю атмосферу; иными словами, если влияние солнечной активности на погоду существует, должен существовать механизм передачи воздействия волнового и корпускулярного излучения на верхние слои атмосферы вниз, в тропосферу.

Предлагались разные варианты возможных механизмов: 1) долгосрочные изменения солнечного излучения, в результате чего изменяется энергетический баланс в атмосфере Земли [Friis-Christensen, Lassen, 1991; Wilson, 1998; Solanki, Krivova, 1999; Solanki, Krivova, 2003]; 2) изменчивость солнечного ультрафиолетового излучения и его влияние на стратосферный озон и тропосферную циркуляцию [Пудовкин, Распопов, 1992; Lean, Rind, 2001; Haigh, 2003]; 3) влияние галактических космических лучей на облачный покров [Tinsley, 1996; Svensmark, Friis-Christensen, 1997; Pulkkinen et al., 2001]; 4) изменение атмосферных параметров под воздействием галактических космических лучей [Gerhard et al., 2001], модификаций глобальной электрической цепи и процессов на уровне микрофизики облаков [Tinsley, 1996]. В работе [Carslaw et al., 2002] предлагаются следующие механизмы связи солнечной изменчивости и климата: 1) изменения в солнечном излучении, приводящие к изменению приходящегося на нижнюю атмосферу тепла; 2) солнечная ультрафиолетовая радиация в совокупности с изменением концентрации озона приводит к нагреванию стратосферы; 3) галактические космические лучи, модулированные долговременной солнечной магнитной активностью и вариациями земного магнитного поля.

В рамках гипотез о влиянии геомагнитной активности на климат Земли возможные механизмы предложены в работах [Bucha, 1988 a, b], согласно которым магнитосфера обладает ресурсами, которые могут влиять на образование вихрей в нижней атмосфере. Во время протекания магнитных бурь в авроральном овале (на высоте около 100 км) генерируются токовые системы (до 10^6 А), что приводит к возрастанию температуры в стратосфере и тропосфере вплоть до уровня моря. При этом в ближайшие несколько дней происходит усиление циклогенеза у поверхности Земли; высотно-фронтальная зона опускается к югу, усиливая циклоническую деятельность над Северным полушарием. Дальнейшее развитие эта гипотеза получила в работе [Bucha, Bucha, 1998] уже с привлечением планетарных волн, однако вопрос о распространении динамических возмущений от "теплой" ионосферы в "холодную" мезосферу и стратосферу здесь не решается. Другим примером могут служить механизмы распространения акустико-гравитационных и планетарных волн, разные варианты которых подробно освещены в работах [Charman et al., 1974; Авдюшин, Данилов, 2000].

Можно привести ряд других гипотез, но авторы не могут (и не преследуют такую цель) делать обзор многочисленных публикаций на эту тему. Однако обратим внимание, что в их основе лежит фактический материал в первую очередь по длинным временным сериям наблюдений (более 100 лет), а также на тенденцию смещения интересов в области исследований влияния солнечной активности на погоду и климат от электромагнитного излучения к корпускулярному. Гипотезы о механизмах возможного влияния солнечной активности на атмосферные и климатические параметры, в основе которых рассматриваются такие космические агенты, как галактические (ГКЛ) и солнечные (СКЛ) космические лучи, способные проникать в глубокие слои атмосферы (несмотря на их сравнительно ничтожно малый вклад по отношению к волновому излучению Солнца), изложены в работах [Витинский и др., 1976; Пудовкин, Распопов, 1992; Веретененко, Пудовкин, 1993, 2000; Tinsley et al., 1994; Kirkby, 2007]. ГКЛ являются основным источником ионизации в верхней атмосфере, их вариации приводят к значительным изменениям ионизации, которая, предположительно, модулирует процессы, связанные с образованием облаков (см., например, [Ney, 1959; Pudovkin, Veretenenko, 1997; Svensmark, Friis-Christensen, 1997; Svensmark, 2000; Carslaw et al., 2002]). Есть большое количество работ, оспаривающих либо подтверждающих значимые корреляции между космическими лучами и облачностью (см., например, ссылки в обзоре [Kirkby, 2007]). Краткие обзоры современных исследований атмосферных эффектов в связи с ГКЛ представлены в работах [Usoskin et al., 2009; Calisto et al., 2011].

В одной из ранних работ [Витинский и др., 1976] рассматриваются три основных механизма воздействия космических агентов (ГКЛ, СКЛ) на нижнюю атмосферу — химический, электрический и конденсационный, а отдельно — предположение о влиянии на циркуляцию атмосферы галактических протонов в диапазоне энергий $(3-20) \cdot 10^8$ эВ. В серии работ [Пудовкин, Распопов, 1992; Пудовкин, 1996; Pudovkin, Veretenenko, 1997] рассмотрен механизм воздействия потоков протонов высоких энергий на атмосферу Земли в связи с изменением ее прозрачности. Вполне преодолимым оказалось основное возражение против возможности эффективного воздействия солнечной активности на состояние нижней атмосферы и погоду, основанное на недостаточной мощности солнечного ветра. Энергия, необходимая для со-

здания атмосферного оптического экрана, оказалась на несколько порядков меньше, чем амплитуда вызываемых этим экраном вариаций потока солнечной энергии, поступающей в нижнюю атмосферу.

Что характерно для подавляющего большинства из предлагаемых механизмов — это присутствие электромагнитной компоненты либо прямое указание на роль магнитных полей от разных источников. Модуляция и рассеивание потоков ГКЛ, вторгающихся в земную атмосферу, связаны не только с гелиомагнитными полями, но и зависят от главного магнитного поля. Последнее по-разному экранирует поток ГКЛ, поступающий в низкие и высокие широты, а также постоянно изменяется на временных масштабах от первых лет. Рассмотрим в этой связи коротко- и длиннопериодные изменения главного МПЗ в связи с флуктуациями климатических параметров.

Корреляция между магнитными и климатическими параметрами на разных временных шкалах. Многие исследования последнего десятилетия показывают, что на временных шкалах от десятилетий до столетий и больше прослеживается связь между изменениями параметров геомагнитного поля и климата.

Высокочастотные вариации МПЗ (временные масштабы от 10^3 с), обусловленные внешними токами в ионосфере и магнитосфере, и корреляция соответствующих им магнитных индексов (aa, Kp и др.) с солнечной радиацией, числами Вольфа, космическими лучами, приземной температурой и другими параметрами описаны во многих статьях (см., например, [Cliver et al., 1998; Svensmark, 1998; Bard et al., 2000; Crowley, 2000; Svensmark, 2000; Solanki et al., 2000, 2002; Foukal, 2002; Carslaw et al., 2002; Kristjansson et al., 2004; Shea, Smart, 2004; Usoskin et al., 2003, 2005; Foukal et al., 2006; Bard, Frank, 2006; El-Borie, Al-Thoyaib, 2006; Valev, 2006; Brohan et al., 2006; Scafetta, West, 2006; Courtillot et al., 2007; Lockwood, Fröhlich, 2007; Vieira, da Silva, 2008; Elias et al., 2010; Mufti, Shah, 2011; Stauning, 2011; Love et al., 2011; Souza Echer et al., 2011, 2012; Lockwood, 2012].

Значительно меньше работ посвящено связи главного геомагнитного поля, генерируемого в ядре Земли (временные масштабы от 10^8 с), и климата (например, [Gallet et al., 2003, 2005; Bakhmutov, 2006; Courtillot et al., 2007; Kovaltsov, Usoskin, 2007; Usoskin et al., 2009; Kerton 2009; Бахмутов и др., 2011; Kitaba et al., 2013]). Регулярные инструментальные наблюдения как магнитных, так и климатических параметров

редко превышают 100 лет, поэтому и корреляции между ними в масштабах нескольких последних десятилетий считаются наиболее достоверными. В обзоре [Courtillet et al., 2007] авторы приводят примеры для разных временных масштабов (вековые вариации за последние 100 лет, исторические и археоманнитные данные за последние 5000 лет), а также рассматривают вероятные механизмы таких корреляций.

Далее, вглубь веков, информацию по изменениям магнитного поля и климата получают непрямими методами на временных масштабах тысячи лет и более. При этом археоманнитный метод ограничен последними 7—8 тыс. лет (палеоманнитный метод возрастных ограничений не имеет, но наиболее достоверные данные, позволяющие изучать палеовековые вариации геомагнитного поля, охватывают только последние несколько десятков тысяч лет), а палеоклиматические данные считаются наиболее репрезентативными за последние 12—13 тыс. лет. Для более длинных временных рядов корреляции между магнитным полем и изменениями климата становятся более спекулятивными. Казалось бы, что кратковременные резкие изменения напряженности геомагнитного поля (например, "археоманнитные джерки") могут влиять на изменения климата (например, через механизм космические лучи — облачность во время экстремальных изменений главного геомагнитного поля). В некоторых публикациях рассматриваются связи между геомагнитными экскурсами в эпохе Брюнес (необходимо отметить, что их количество точно не установлено), прецессией земной оси и периодами межледниковья, а также между циклами Миланковича и вариациями напряженности древнего геомагнитного поля (см. ссылки в обзоре [Courtillet et al., 2007]), что также является предметом горячих дискуссий.

Корреляция разных параметров сама по себе недостаточна, чтобы продемонстрировать причинно-следственные связи. Основная проблема — малая изученность механизмов, посредством которых геомагнитное поле может влиять на климат на разных временных масштабах. Далее нами будут рассмотрены фактические материалы, основанные на результатах прямых инструментальных наблюдений за последние сто лет, что исключает неоднозначности (спекуляции), свойственные интерпретации палеоданных, получаемых непрямими методами исследований.

Данные и методика. Для анализа пространственно-временных изменений геомагнитного

поля, а также полей приземного давления и температуры, использована единая методика [Мартазинова, Иванова, 2011]. Расчеты выполнялись для средних широт Северного полушария (40—70° с. ш.) для каждого десятилетия XX в.

Величины геомагнитного поля рассчитывались по глобальной модели МПЗ IGRF (International Geomagnetic Reference Field, <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/index.html>). Она позволяет вычислять значения компонент вектора геомагнитного поля и его вековых вариаций в любой точке пространства, но мы ограничимся только поверхностью Земли. По коэффициентам IGRF синтезировалось поле модуля полного вектора геомагнитного поля F (нТл) и его вековых вариаций с 1900 по 2010 г. с шагом 10 лет, которые приводились к узлам регулярной географической сетки с шагом 10° по широте и долготе.

Для расчета полей приземного давления P и приземной температуры T был использован архив полей ВНИГМИ-МЦД, Обнинск, данные реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF the 40 Years Re-Analysis, ERA-40, <http://www.ecmwf.int/research/era/do/get/index>), а также данные архива отдела климатических исследований и долгосрочного прогноза УкрГМИ. Расчеты выполнялись для января месяца, среднедесятилетние значения P и T приводятся в узлах регулярной сетки с шагом 10° по широте и долготе.

Таким образом, значения полей представлены в виде матрицы:

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ X_N \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1j} & \dots & X_{1K-1} & X_{1K} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2j} & \dots & X_{2K-1} & X_{2K} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{N1} & X_{N2} & \dots & X_{Nj} & \dots & X_{NK-1} & X_{NK} \end{bmatrix},$$

$$j = 1, 2, \dots, K; \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

где элементы X_{ij} матрицы X соответствуют значениям исследуемых величин в ij -узле регулярной географической сетки для каждого десятилетия; K — количество долгот, N — широт.

Каждое поле отдельного десятилетия можно представить в виде интегральной кривой с

помощью меридионального осреднения для средних широт Северного полушария (40—70° с. ш.):

$$\bar{x}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ij}, \quad (2)$$

где x_{ij} — среднее значение величины для j -й долготы.

Тогда поле исследуемой величины для каждого десятилетия в интегральном виде запишется как

$$\bar{X} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_j, \dots, \bar{x}_K), \quad (3)$$

где элементы \bar{x}_j вектора-строки \bar{X} — среднее значение исследуемой величины для j -й долготы на Северном полушарии, $j = 1, 2, \dots, 36$ и соответствует номеру долготы от -180 до 180° в. д.

Результаты применения изложенной выше методики для анализа изменений геомагнитного, барического и поля температуры приведены в следующих разделах.

Изменения геомагнитного поля в XX в.

Пространственно-временная структура главного геомагнитного поля в XX в. достаточно хорошо изучена по среднегодовым значениям геомагнитного поля, которые определяют его вековую вариацию (SV). Разность между среднегодовыми значениями (вековой ход) позволяет оценить скорость изменения поля в разных районах Земли для разных эпох. Поскольку наиболее длинные ряды инструментальных наблюдений редко превышают 100 лет, максимальные периоды SV ограничиваются 80 годами. В этом диапазоне они группируются в четырех интервалах: 60—70, 30—40, 18—25, 10—11 лет. Самые интенсивные — вариации с периодом 60 лет (до 100 нТл/год), обусловленные внутренними источниками. В диапазоне до первых лет вариации внешних и внутренних источников перекрываются [Бахмутов, 2006].

Характер изменений геомагнитного поля отличается в разных областях земного шара. Например, на рис. 2, а представлены данные по магнитной обсерватории "Иркутск" (52,27° с. ш., 104,45° в. д.), где регулярные непрерывные измерения геомагнитного поля проводятся с 1887 г. График модуля полного вектора геомагнитного поля указывает как на увеличение F на 1700 нТл, так и на цикличность векового хода F с периодом около 50 лет. Первый цикл выделен с 1895 по 1945 г., его минимум приходится на 1917 г., второй — с 1945 по 1995 г. с минимумом в 1970 г. Амплитуды двух первых циклов сравнимы и со-

ставляют около 100 нТл, третий цикл начался недавно, но, как видно из графика, его амплитуда пока значительно меньше.

Для сравнения на рис. 2, б приведен один из самых длинных рядов наблюдений на обсерватории Эскдалемюр (ESK), Великобритания (55,32° с. ш., 356,8° в. д.). Здесь характерно уменьшение F с 1908 до 1930 г., а с 1930 г. и до нашего времени наблюдается рост с некоторыми замедлениями в конце 1970-х и всплеском в начале 1990-х годов.

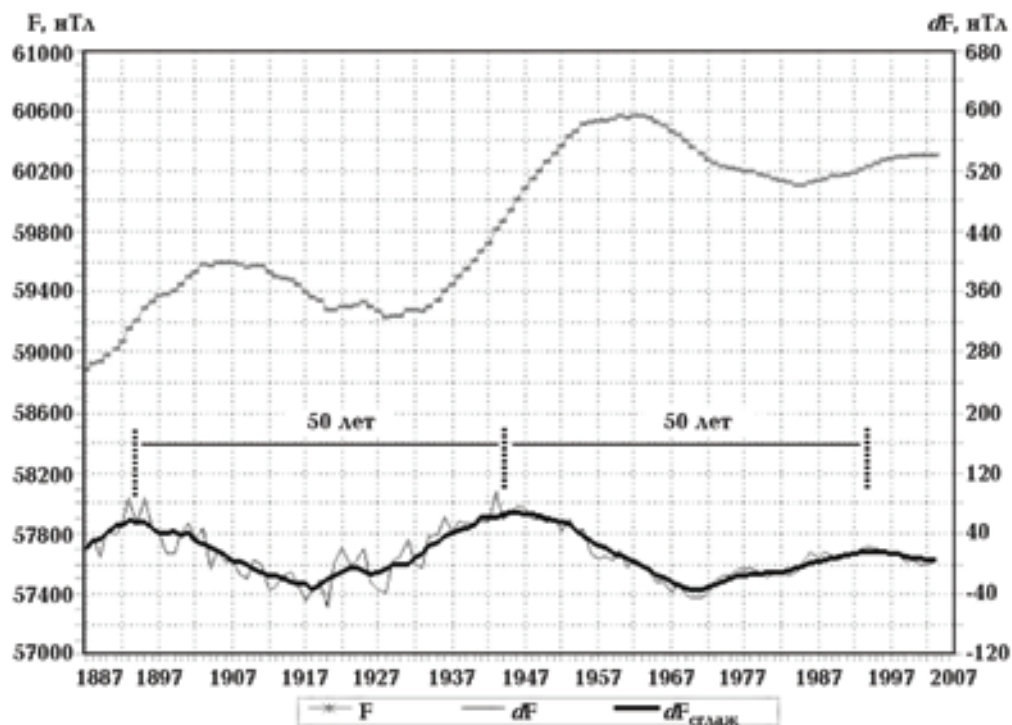
Как видно из графиков, изменения геомагнитного поля происходят неравномерно, вековой ход имеет региональные особенности. Кроме того, обсерватории и пункты векового хода (основные источники информации) расположены крайне неравномерно по земному шару. Поэтому геомагнитное поле описывают модели, построенные на основе данных наблюдений на обсерваториях, пунктах векового хода, спутниковых измерениях, повторных магнитных съемок и др. (см., например, [Бондарь и др., 2006]). Наиболее популярной и полной является модель IGRF, по которой далее и проводились расчеты.

В Северном полушарии основные структуры — Канадская (около -100° з. д. и 50° с. ш.) и Сибирская (около 110° в. д. и 65° с. ш.) аномалии. На рис. 3 видно, что за прошлое столетие интенсивность геомагнитного поля в районе Канадской аномалии уменьшилась, а ее центр сместился к северу и западу. В районе Сибирской аномалии интенсивность возросла, а ее центр сместился к юго-западу.

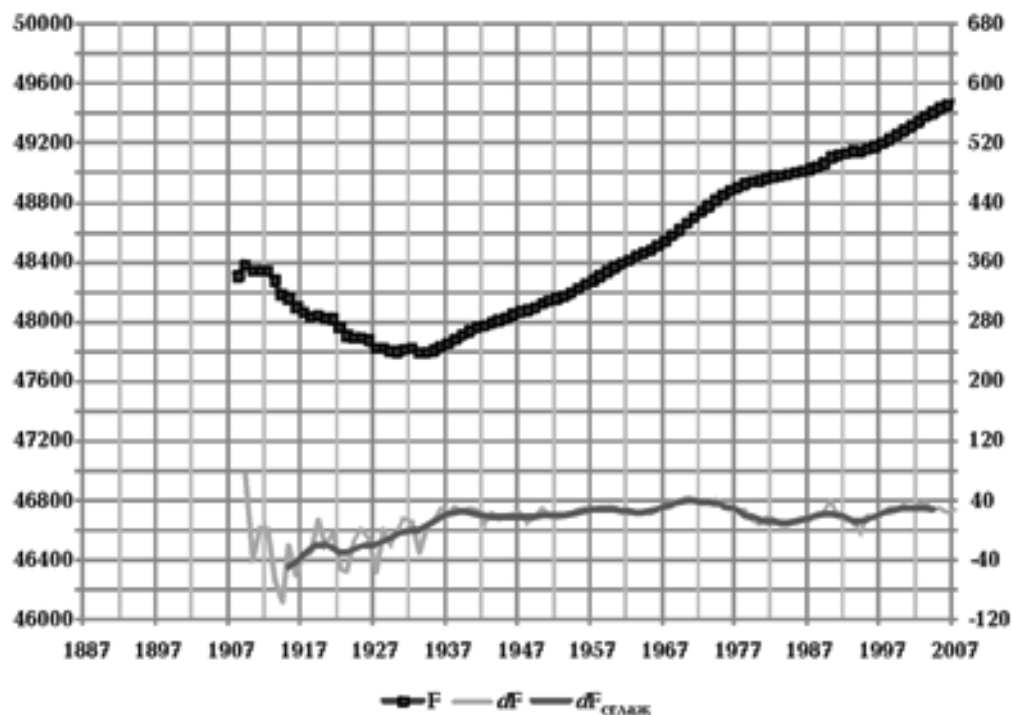
Поскольку Канадская аномалия близка к геомагнитному полюсу, такие изменения могут отражать его движение, скорость которого значительно возросла после 1990 г. [Olsen, Manda, 2007].

При анализе модели IGRF авторы работы [Wenya et al., 2000] указывают, что геомагнитное поле в XX в. изменялось очень быстро. Это может быть связано с началом инверсии. За 100 лет дипольный момент уменьшился на 6,5%, от $8,32 \cdot 10^{22}$ Ам² в 1900 г. до $7,78 \cdot 10^{22}$ Ам² в 2000 г. В то же время наблюдается увеличение мультипольных компонент (члены ряда с $n = 2, 3, \dots$) — квадрупольная и октупольная компоненты увеличились на 95 и 74% соответственно.

Изменения геомагнитного поля прослеживаются по картам вековой вариации. По данным спутниковых векторных магнитных съемок изучены их особенности в интервале 1980—2007 гг. [Бондарь и др., 2008]. Фокусы векового хода возникают и распадаются за время около



а



б

Рис. 2. Модуль полного вектора напряженности геомагнитного поля F и его вариаций по данным магнитной обсерватории IRT, Иркутск, Россия (<http://ru.iszf.irk.ru>) (а) и ESK, Эскдалемюр, Англия (б) (www.geomag.bgs.ac.uk/gifs/annual_means.shtml).

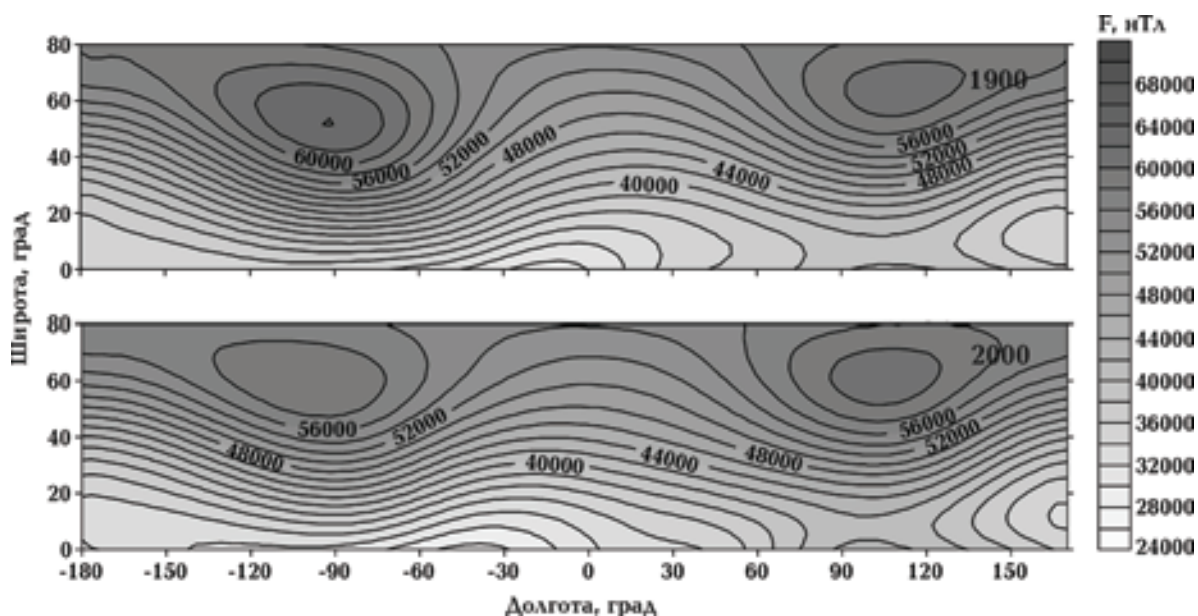


Рис. 3. Структура геомагнитного поля в Северном полушарии: модуль полного вектора F (по IGRF) в 1900 и 2000 г.

60 лет, и эти вариации имеют наибольшую амплитуду. Например, вариация с характерным временем порядка десятков лет и фокусом с центром 22° с. ш. и 80° в. д. В конце прошлого века он виден как рост сегмента Сибирской аномалии, а к эпохе 2002—2005 гг. его магнитуда достигла 120 нТл/год, т. е. возникла новая "быстрая" аномалия с магнитудой 1000 нТл. Фокусы "быстрых" аномалий расположены между мировыми аномалиями, их размеры меньше по сравнению с последними. Есть предположение, что "быстрые" вариации являются результатом взаимодействия соседних мировых аномалий, происходящего на их границе [Бондарь и др., 2008].

На картах вековой вариации F_{sv} , построенных по данным IGRF для Северного полушария (рис. 4), видно, что для II—IV десятилетий характерно наличие крупных фокусов векового хода, для V—VII — более мелких, а начиная с VIII снова наблюдается тенденция к укрупнению фокусов, особенно ярко выраженная в Западном полушарии, где наблюдается отрицательный фокус векового хода на 60° з. д. и 20° с. ш. Положительный фокус векового хода в Восточном полушарии (около 60° в. д. и 20° с. ш.), существовавший в I—IV десятилетиях, распался в V—VI десятилетиях на более мелкие положительные фокусы, в VII—IX десятилетиях в этой зоне наблюдаются отрицательные фокусы, а к концу века — слабые положительные.

Аналогичные данные получены и по разрабатываемой в ИЗМИРАН модели динамических источников главного магнитного поля и ее сравнения с данными обсерваторий [Демина и др., 2008]. В пространственной структуре векового хода компонент главного МПЗ авторы выделяют три периода: 1900—1940 гг. (наличие глобальных аномалий векового хода), 1940—1960 гг. (глобальные аномалии распадаются на многочисленные локальные), 1960 г. — настоящее время (вновь формируются глобальные аномалии) [Демина и др., 2008].

На рис. 5, а приведены интегральные характеристики модуля полного вектора геомагнитного поля F для средних широт Северного полушария для каждого десятилетия XX в. Здесь выделяются два максимума, обусловленные Канадской и Сибирской мировыми магнитными аномалиями. Временная диаграмма (рис. 5, б) показывает уменьшение интенсивности Канадской аномалии за 100 лет почти на 4000 нТл, уменьшение Европейско-Азиатской аномалии на 2000 нТл и возрастание интенсивности Сибирской аномалии к началу нынешнего столетия.

На рис. 6, а представлена многолетняя интегральная характеристика F за 100 лет. Если последнюю вычестить из средних интегральных кривых для каждого десятилетия, получим пакет кривых отклонений F от средней многолетней кривой (рис. 6, б).

Как видно из рис. 6, в 1900—1930 гг. максимальные значения F приходятся на $80\text{--}110^\circ$ з. д., что соответствует положению Канадской мировой аномалии, минимальные — на $30\text{--}60^\circ$ в. д. С 1940 г. кривая отклонения интегральных кривых F сглаживается (см. рис. 6, б) и занимает промежуточное положение между пакетом кривых 1900—1930 гг. и 1950—2000 гг. В 1950—2000 гг. на $80\text{--}110^\circ$ з. д. отмечается минимум, а на $30\text{--}60^\circ$ в. д. — максимум.

Временная диаграмма отклонений F от среднего за 100 лет (рис. 7) более наглядно отражает динамику процесса в Северном полушарии. Очевидно, можно выделить три временных интервала: с начала XX в. до середины 1930-х годов, с середины 30-х до середины 60-х годов, с конца 60-х до настоящего времени. В первом и последнем изменчивость поля по долготе (относительно среднего значения) достаточно резкая, в то время как в 40-х — 60-х годах поле изменяется незначительно. Об этих же трех периодах было сказано выше, их границы несколько “размыты” с учетом методики обработки данных (среднедекадные значения), и, как будет показано ниже, такая же закономерность прослеживается и в изменении климатических параметров.

Таким образом, в картине геомагнитного поля XX в. на основании рассмотренных нами данных расчетов по модели IGRF можно выделить следующие особенности:

- в средних широтах Северного полушария ($40\text{--}70^\circ$ с. ш.) выделяются два максимума, обусловленные Канадской и Сибирской мировыми магнитными аномалиями, и два минимума; их амплитуда достигает 12000 нТл;
- на протяжении XX в. отмечается уменьшение интенсивности Канадской аномалии почти на 4000 нТл, Европейско-Азиатской аномалии — почти на 2000 нТл и возрастание интенсивности Сибирской аномалии;
- при анализе карт векового хода (см. рис. 4) визуально можно отметить, что для II—IV десятилетий характерно наличие крупных фокусов векового хода, для V—VII — более мелких, а начиная с VIII десятилетия вновь наблюдается тенденция к укрупнению фокусов;
- в пространственно-временной структуре магнитного поля выделяются три интервала (с начала XX в. до середины 1930-х годов, с середины 30-х до середины 60-х годов, с конца 60-х до настоящего времени), характеризующиеся разным поведением геомагнитного поля.

Интегральная характеристика декадных полей приземного давления и температуры в XX в.

Климат Земли на протяжении XX в. испытывал значительные изменения, которые наиболее четко проявлялись в повышении глобальной температуры на поверхности Земли (рис. 8). Это отмечается во многих районах земного шара, что приводит как к изменению крупномасштабной атмосферной циркуляции, так и к существенному преобразованию региональных климатических условий, что сопровождается большим количеством погодных аномалий. На протяжении XX в. выделяют три периода изменения глобальной температуры:

- период первого глобального потепления XX в. — временной интервал с начала века и до середины 40-х годов (1911—1943), который характеризуется интенсивным повышением температуры;
- период стабилизации — с конца 40-х до начала—середины 70-х годов, когда отмечается относительная стабильность, при этом глобальные температуры соответствуют значениям конца предыдущего периода;
- период второго глобального потепления XX в. — с начала—середины 70-х годов до настоящего времени отмечается новый интенсивный подъем температуры, при котором рекордные значения достигнуты в последние десятилетия.

Продолжительность каждого периода составляет около 30 лет. Резкий подъем температуры начался в конце первого десятилетия XX в.

Анализ изменения полей давления и температуры от десятилетия к десятилетию на протяжении XX в. выполнен для января месяца, когда синоптические процессы проявляются более активно. Кроме того, в последние десятилетия именно в январе отмечается заметное изменение температурного режима в связи с глобальным повышением температуры.

На рис. 9 представлены интегральные характеристики полей приземной температуры каждого десятилетия XX в. Наибольшие и наименьшие значения определяют местоположения центров высоких и низких температур в Северном полушарии. Сравнение их положения и значения от десятилетия к десятилетию на протяжении XX в. помогает понять изменение температурного режима во времени и пространстве за каждый период глобального потепления.

Два максимума, которые находятся в восточной части Тихого океана и в районе Атлантического океана, соответствуют фронтальным

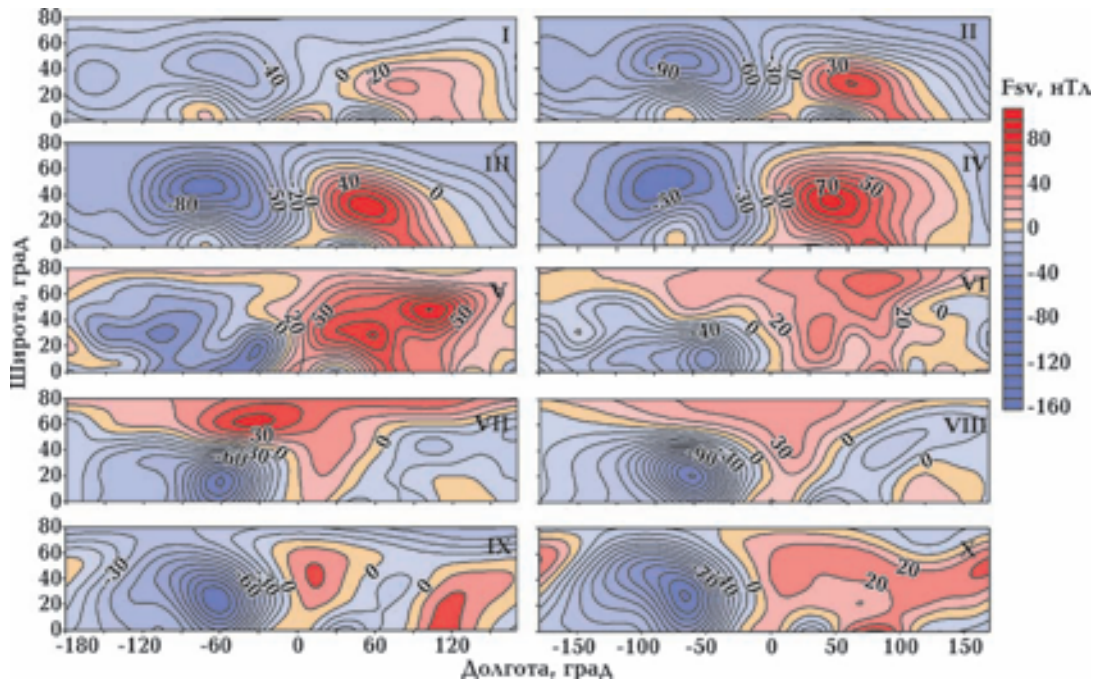


Рис. 4. Карты векового хода F_{sv} для Северного полушария для последовательных десятилетий XX в. Изолинии проведены через 10 нТл. Римскими цифрами указан номер десятилетия.

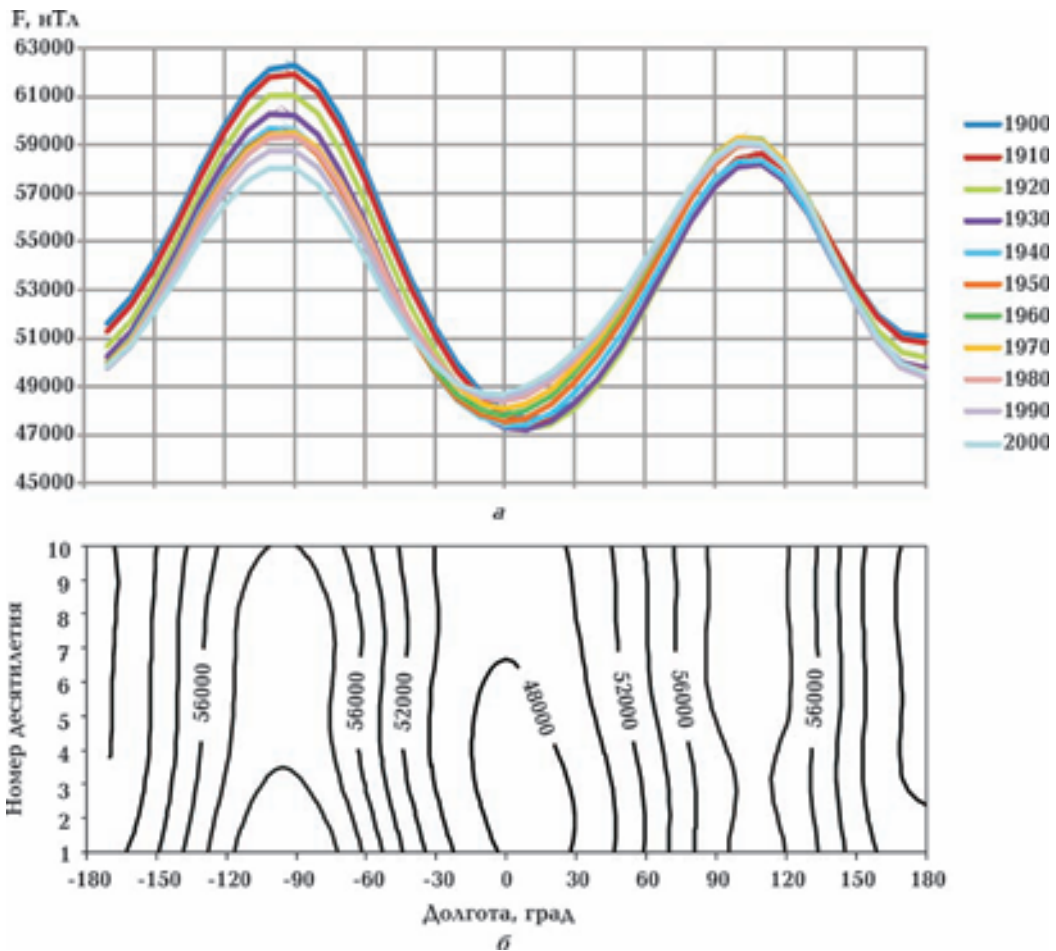


Рис. 5. Интегральные характеристики модуля полного вектора геомагнитного поля F для средних широт Северного полушария (а) и временная диаграмма F для каждого десятилетия XX в. (б).

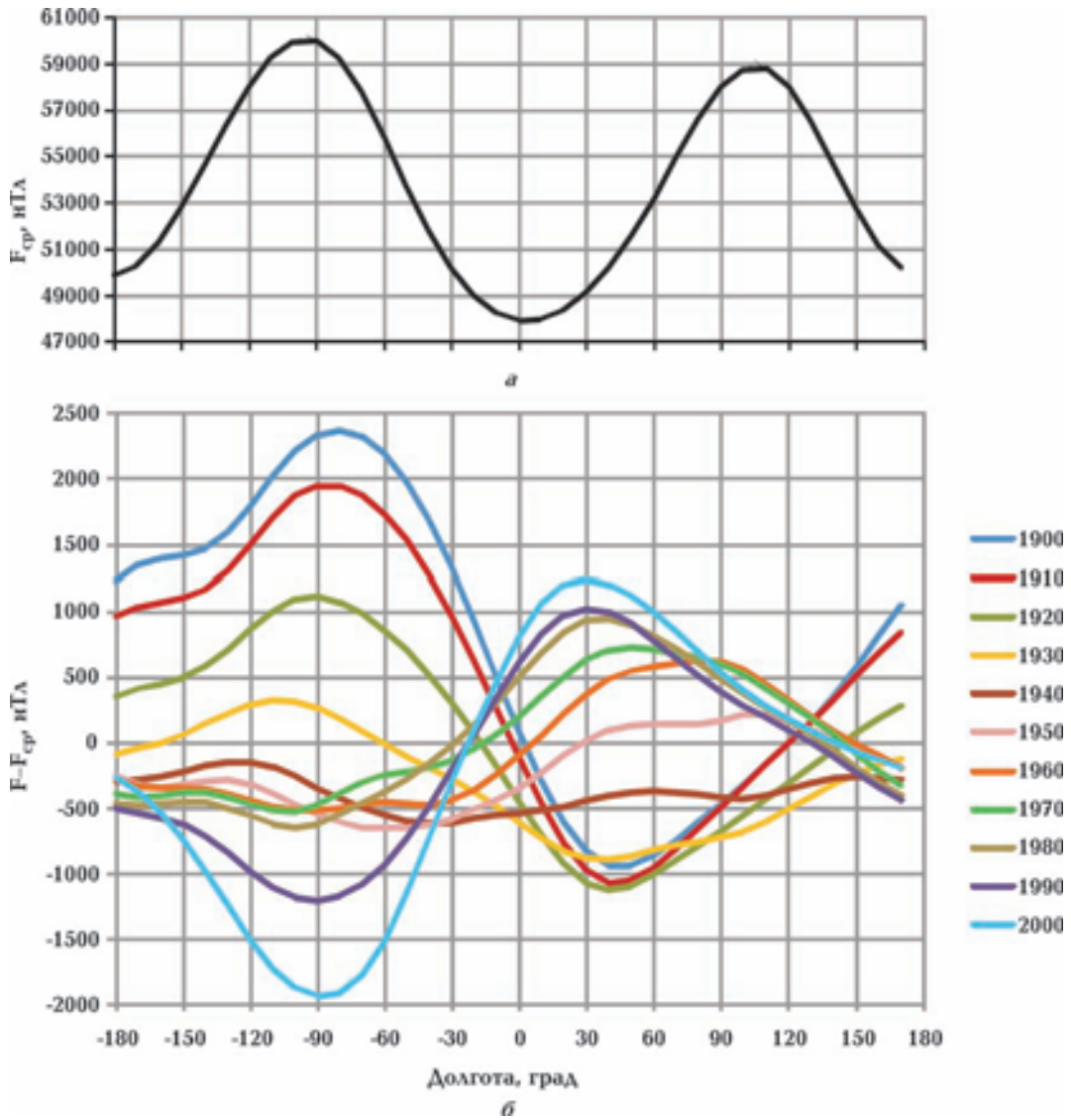


Рис. 6. Интегральная характеристика F за 100 лет (а), отклонения средних интегральных кривых F каждого десятилетия XX в. от многолетней интегральной кривой (б).

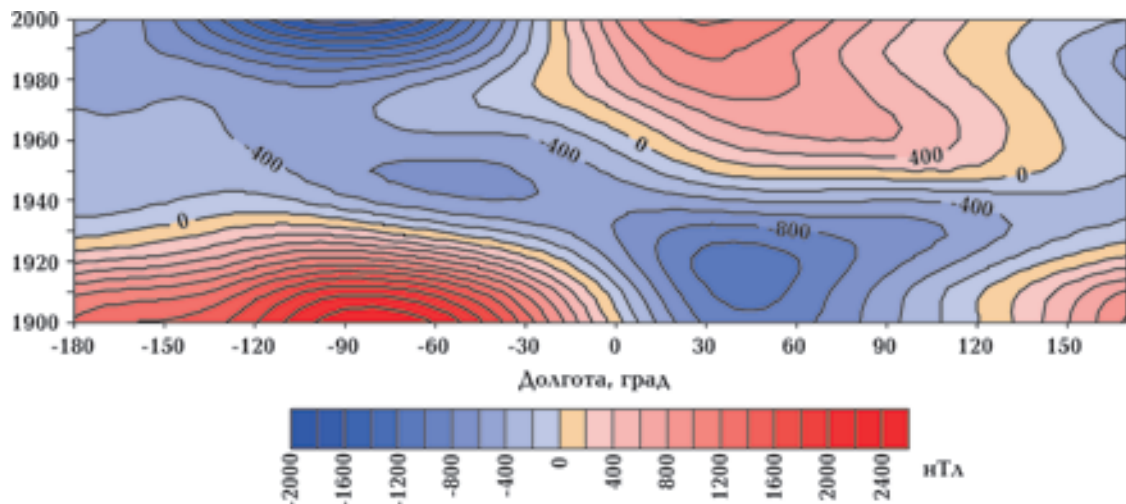


Рис. 7. Временная диаграмма отклонений модуля полного вектора геомагнитного поля F от среднего за 100 лет в среднеширотном поясе $40\text{--}70^\circ$ с. ш. Изолинии проведены через 200 нТл.

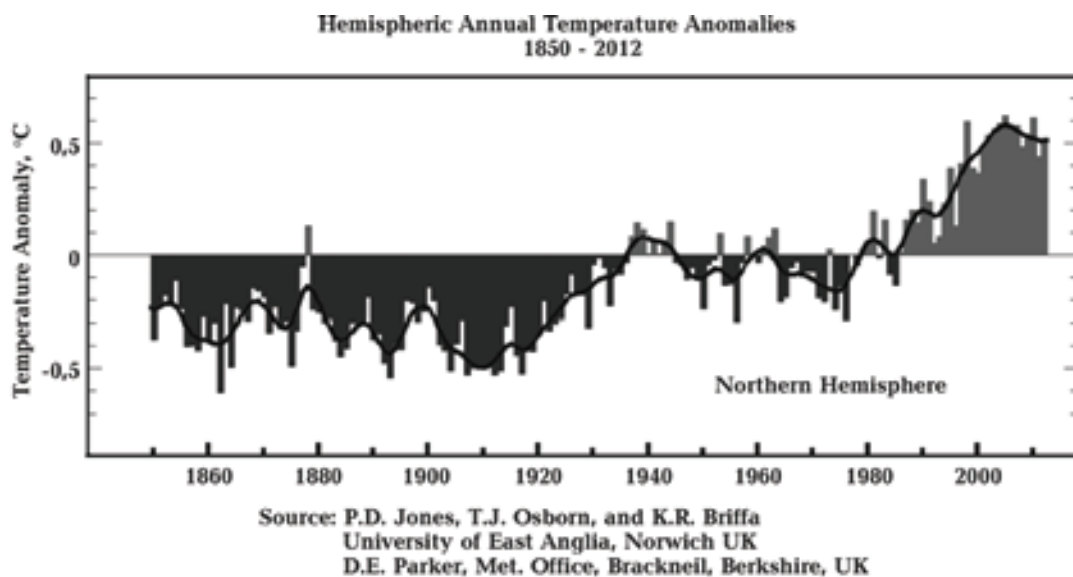


Рис. 8. Аномалии глобальной температуры на поверхности Земли в Северном полушарии за последние 160 лет (<http://cdiac.ornl.gov/trends/temp/jonescru/jones.html>).

частям Исландского и Алеутского минимумов давления. Минимальные значения относятся к двум центрам — в Северной Америке и центральной Сибири.

Для более наглядного представления изменений интегральных характеристик температуры от десятилетия к десятилетию на рис. 10 представлена их временная диаграмма. В первых десятилетиях XX в. изменения температур по долготам, за исключением восточно-американского и тихоокеанского секторов, незначительны на фоне общего роста температуры. Во втором периоде все очаги аномальных температур немного укрупнились, но в целом остаются стабильными. Наибольшие изменения тем-

пературы происходят в третьем периоде изменения глобальной температуры. Особенно отмечается усиление очагов низких температур районов Канадского и Сибирского максимумов давления к концу XX в. Рост температуры наблюдается над Северной Америкой, Атлантическим и Тихим океанами, в районе Сибири.

Пространственное положение максимумов и минимумов приземной температуры воздуха следует рассматривать в системе общей циркуляции атмосферы в умеренных широтах Северного полушария. Последняя в значительной степени контролируется основными центрами действия атмосферы (ЦДА), которые представляют собой квазистационарные области высо-

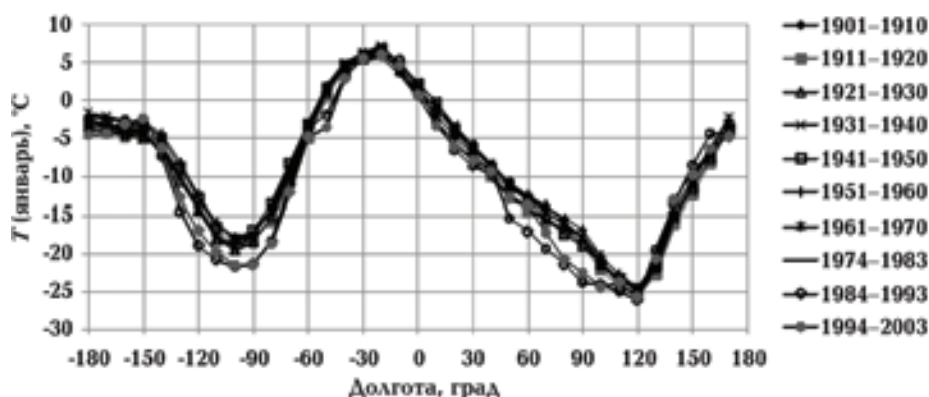


Рис. 9. Осредненные по долготам январские температуры в диапазоне широт от 40 до 70° с. ш. для каждого десятилетия XX в.

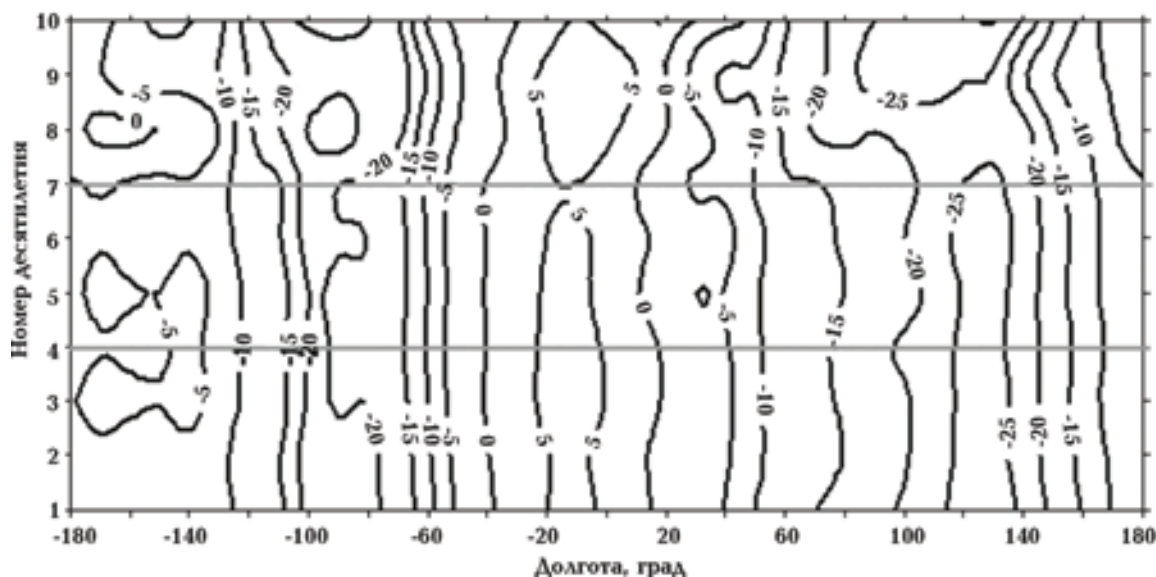


Рис. 10. Временная диаграмма интегральной характеристики поля среднемесячной температуры января от десятилетия к десятилетию XX в., °С.

кого и низкого давления. Активность ЦДА нарушает зональность атмосферного потока. В Южном полушарии, где большая часть поверхности покрыта водами океанов, в основном преобладает зональный тип циркуляции. Для Северного полушария, где площади, занятые океанами и континентами, сопоставимы, прослеживается трехвихревая система циркуляции, в которой:

- а) первый вихрь — Исландский минимум, расположенный над районом Исландии, южной оконечности Гренландии и простирающийся до Канадской Арктики над Баффиновой Землей. Несколько изменяя свою интенсивность и протяженность, он сохраняется круглый год;
- б) второй вихрь — Европейская ложбина — располагается над территорией Европы;
- в) третий вихрь — Алеутский минимум, центр которого находится над оконечностью Алеутских островов между восточным побережьем п-ова Камчатка и Аляской примерно на 50° с. ш. Он более активен в зимнее время, чем в летнее.

Между ЦДА низкого давления располагаются ЦДА высокого давления. Между Исландским и Европейским минимумами находится Азорский максимум. Летом он простирается на восток до районов Средиземного моря и в засушливые периоды еще далее на восток, а в зимнее время располагается в районе восточной части Атлантического океана, вытягиваясь

вдоль Гольфстрима на север (Северо-Атлантический максимум). В районе 100° в. д. располагается Сибирский максимум. Между Алеутской депрессией и Исландским минимумом находится Канадский максимум. Следует отметить, что в средних широтах в течение сезона неоднократно наблюдается смена зонального и меридионального типов циркуляции [Мартазинова, Сverdлик, 1998].

На рис. 11 представлены интегральные характеристики полей приземного давления каждого десятилетия XX в. Наибольшие и наименьшие значения давления определяют географическое положение ЦДА над территорией Северного полушария. Три максимума кривой соответствуют основным ЦДА — Канадскому (слева) и Сибирскому (справа) антициклонам, средний максимум (незначительный, расположен вблизи 10° в. д.) — зимнему Северо-Атлантическому гребню. Минимальные значения соответствуют положению климатических центров низкого давления (два с наименьшими значениями давления — Исландской (50—30° з. д.) и Алеутской депрессиям (около 180°)). Европейскую ложбину (30° в. д.) от Исландского минимума отделяет Северо-Атлантический гребень.

Таким образом, положение центров высокого и низкого давления воздуха образует трехвихревую систему над территорией умеренных широт Северного полушария, изменения которой на протяжении XX в. различны для каждого периода глобального потепления (см. рис. 11).

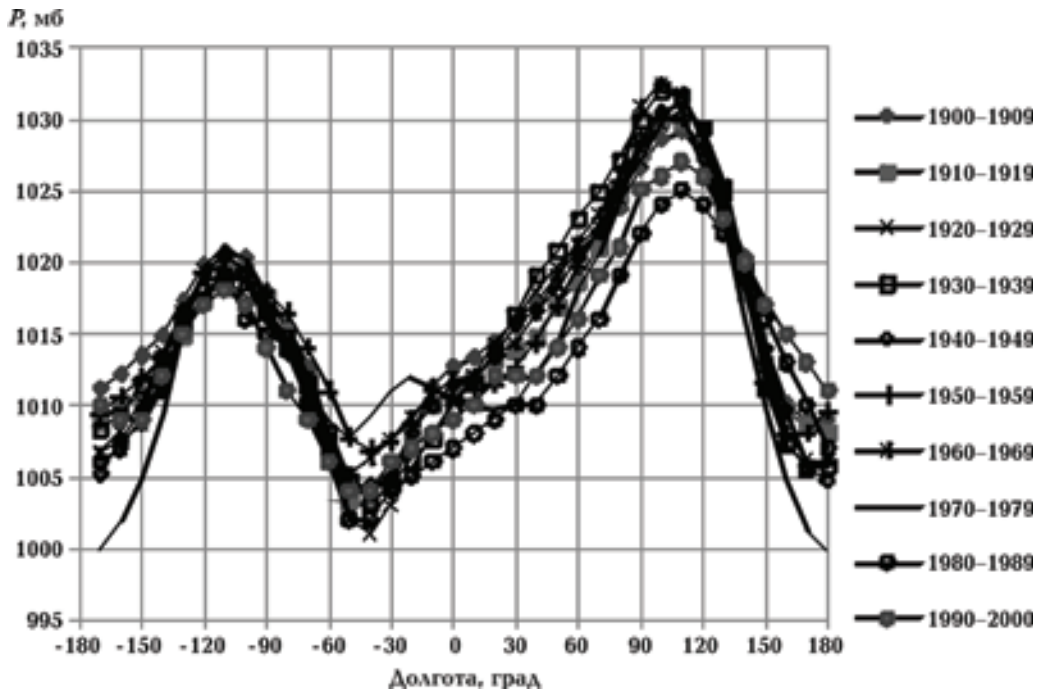


Рис. 11. Осредненное по долготам приземное давление января месяца в диапазоне широт от 40 до 70° с. ш. для каждого десятилетия XX в.

Кривые последовательных десятилетий отличаются друг от друга, и эти отличия определяют свои погодные условия в соответствующем десятилетии. Временная диаграмма приземного давления, построенная по интегральным данным, дает общее представление о циркуляции атмосферы в XX в. и позволяет проследить динамику (рис. 12).

В первом десятилетии XX в. повышение глобальной температуры еще не проявилось (см. рис. 8). Поэтому циркуляция этого десятилетия является контрольной для всех последующих десятилетий глобального потепления. В первом десятилетии наиболее развиты Канадский максимум и Исландский минимум. Необходимо отметить положение Европейской ложбины и Се-

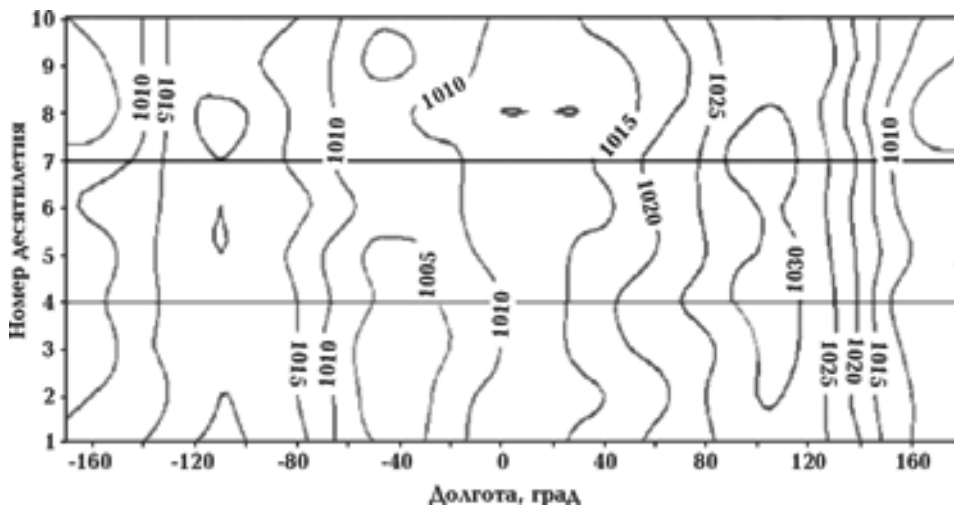


Рис. 12. Временная диаграмма крупномасштабной циркуляции атмосферы (мб) января месяца на протяжении XX в.

веро-Атлантического гребня. Смещение их на восток сказалось на активности Сибирского максимума. Такое положение центров действия атмосферы вызвало в первом десятилетии неустойчивый температурный режим. В следующем десятилетии, начальном для первого глобального потепления, крупномасштабная циркуляция атмосферы преобразовывается в сторону усиления Сибирского максимума и Исландской депрессии. Это преобразование сохранялось и усиливалось до конца периода первого глобального потепления. С ослаблением Канадского максимума связано повышение температуры над Северной Америкой. Ослабление Сибирского максимума в первое десятилетие сохраняло теплые зимы на территории Евразии. Его же усиление и расширение к западу к концу периода первого потепления привело к появлению морозных зим над Европой. В последующий период стабилизации Сибирский максимум занимает обширную территорию, с чем связано общее понижение температуры в Европе. В этот период происходит расширение Канадского максимума, который также увеличивает количество холодных зим в Северной Америке. Следует отметить, что в целом во второй период изменения глобальной температуры (период стабилизации) в Северном полушарии происходит рост давления.

Такое же состояние крупномасштабной атмосферной циркуляции характерно и для первого десятилетия второго периода глобального потепления. В его начале отмечаются отдельные годы с холодными зимами, однако к концу XX в. происходит общее падение давления над территорией Северного полушария, усиление всех климатических минимумов давления и ослабление максимумов. Углубляется Алеутская депрессия и Европейская ложбина, последняя под влиянием теплого Северо-Атлантического гребня смещается к востоку. Притеснение Сибирского максимума с двух сторон соседними депрессиями перекрыло доступ его холодного воздуха в Европу. Таким образом, динамика ЦДА от десятилетия к десятилетию на протяжении XX в. определяла погодные условия в разных регионах средних широт Северного полушария.

Чтобы получить более четкий характер изменений общей циркуляции атмосферы, были построены временные диаграммы отклонения интегральных характеристики полей давления (рис. 13, *а*) и температуры (рис. 13, *б*) каждого десятилетия от интегральной характеристики среднего давления и температуры за столетие.

Очевидно, что относительно незначительные вариации давления в первом и втором периодах существенно изменились в начале третьего периода глобального изменения температуры XX в. (см. рис. 13, *а*). Наибольшие изменения происходят над территорией Тихого океана в районе Алеутской депрессии и над Атлантико-Европейским сектором в районе Европейской ложбины. В последнем десятилетии они практически прекращаются.

В целом можно отметить, что значительное изменение давления преимущественно в сторону его падения произошло с конца второго периода по середину третьего. Однако уже к концу последнего происходит заметное повышение давления над Атлантико-Европейским сектором, связанное с Северо-Атлантическим гребнем. Под его влиянием к концу XX в. здесь происходит резкое изменение зимних погодных условий в сторону аномально теплых и сухих. В то же время рядом с этим ЦДА отмечается понижение давления в Исландском минимуме, хотя оно пока не достигло исходного значения первого десятилетия XX в. Также надо отметить, что к концу столетия прекратилось резкое падение давления в Алеутской депрессии. Таким образом, изменения состояния барического поля к концу XX в. преобразовали и сформировали современный климат Северного полушария и его отдельных регионов.

Диаграмма на рис. 13, *б* позволяет проследить наибольшие изменения в температуре Северного полушария. Очевидно, что период первого глобального потепления, в отличие от периода стабилизации, характеризуется несколько повышенными отклонениями температур по сравнению со средней столетней интегральной характеристикой. Положительные аномалии наблюдаются на большей части рассматриваемой территории. Период второго глобального потепления отмечается формированием относительно интенсивных положительных и отрицательных аномалий, образуются "пятнистые" очаги, что указывает на преобладание региональных особенностей преобразования полей давления и температуры. Особо следует отметить формирование отрицательного очага над Сибирью и повышение температуры на Дальнем Востоке.

Сопоставление пространственно-временных изменений геомагнитного поля и климата в XX в. При сопоставлении кривых интегральных характеристик полей модуля полного вектора магнитного поля F , температуры T и давления P (соответственно рис. 5, *а*, 9, 11)

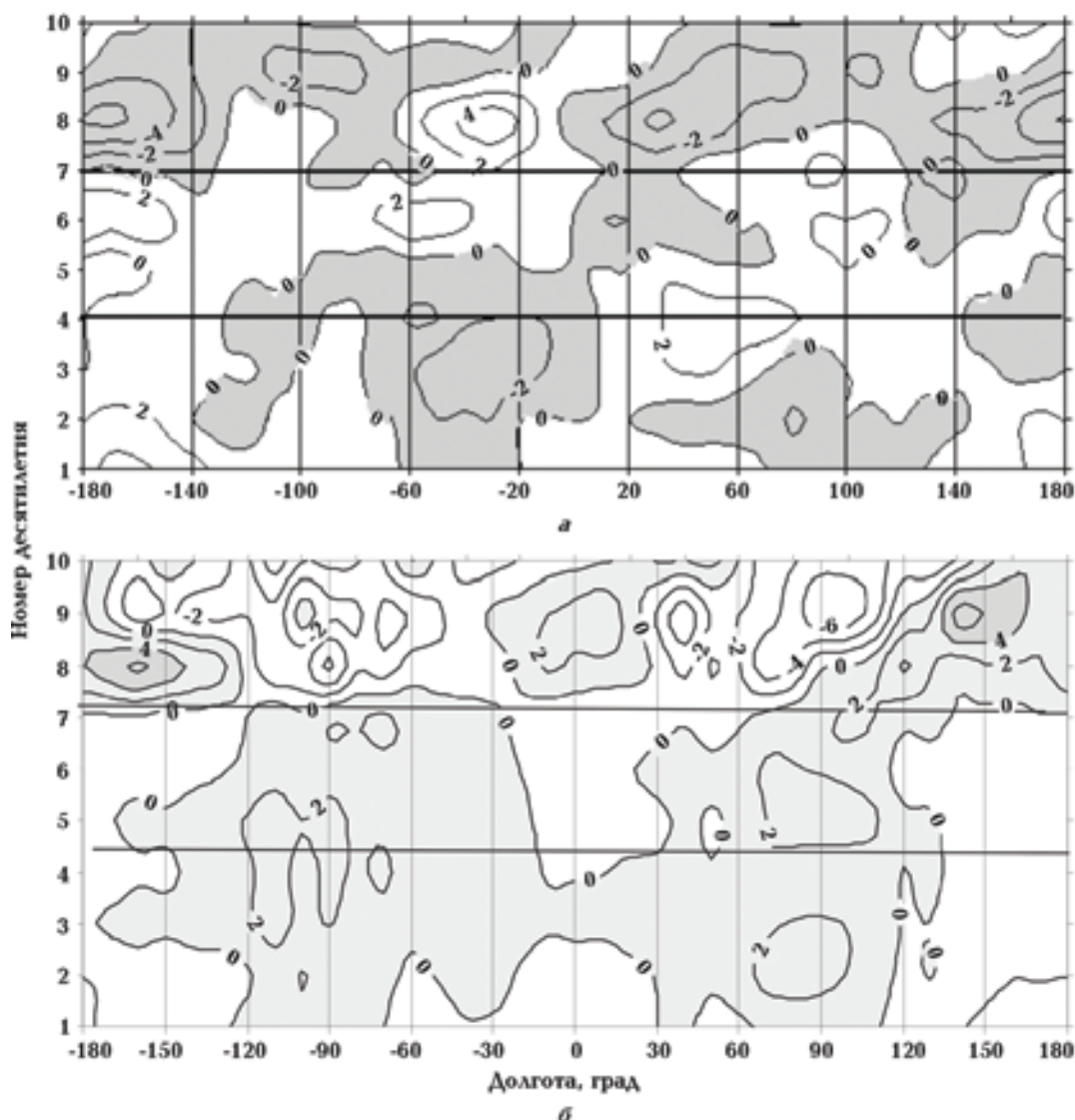


Рис. 13. Временная диаграмма отклонений от среднего за 1900—2000 гг.: *a* — среднедекадных значений давления (мб); *б* — среднедекадных значений температуры, °С.

очевидно, что их минимумы и максимумы достаточно хорошо пространственно соответствуют друг другу. Коэффициенты подобия следующие: $R_{PT} = -0,77$ между P и T , $R_{FP} = 0,66$ между F и P , $R_{FT} = -0,83$ между F и T (на уровне статистической значимости 95%). Если для полей температуры и давления корреляция закономерна, то для пиков T и F довольно неожиданная. Учитывая методику, по которой был получен материал, не удивительно, что поле F представлено на рисунках в более сглаженном виде (расчеты проводились по коэффициентам IGRF), в то время как при расчетах полей T и P за основу был принят наблюдаемый фактический материал. Также несколько неожидан-

ный более высокий коэффициент подобия R_{FT} относительно двух взаимосвязанных параметров R_{PT} . Отметим, что последний при сдвиге на 20° повышается до $R_{PT} = -0,9$.

Итоговые результаты по осредненным полям F , T и P за предыдущее столетие представлены на рис. 14. Учитывая, по каким материалам был получен результат, возможно, такая корреляция неслучайна. Однако если причинно-следственная связь существует, то очевидно, что геомагнитное поле может каким-то образом влиять на приземную температуру (либо давление), но никак наоборот.

Сравнение временных диаграмм (см. рис. 5, б, 7, 10, 12), отражающих динамику полей, не

позволяет визуально выделить какие-либо закономерности в вариациях F и климатических (T и P) параметров. Методы статистического анализа (которые далее нами будут применены во второй части данной статьи) к данному фактическому материалу не приемлемы из-за недостаточного временного разрешения (анализировались среднедекадные значения за 100 лет). На рис. 13 вынесены взаимосвязанные временные диаграммы отклонений среднедекадных значений давления и температуры. Очевидно, что между ними прослеживаются только самые общие закономерности, в деталях они расходятся. На рис. 14 также вынесен график векового хода F_{sv} . Однако если в Западном полушарии можно выделить закономерность его изменения относительно других параметров, то в Восточном эта закономерность нарушается. Поэтому анализ динамики геофизических и климатических полей будет продолжен во второй части статьи, а этот раздел завершим анализом только интегральных характеристик.

Корреляция разных параметров сама по себе не достаточна, чтобы продемонстрировать причинно-следственные связи. Сразу возникает вопрос — каким может быть механизм свя-

зи между магнитным полем и климатом? В первых разделах упоминались работы, указывающие на возможность таких связей (и вероятные механизмы). Магнитное поле Земли способно не только модулировать заряженные частицы, приходящие из космоса, но и упорядочивать стоки этих частиц из магнитосферы в атмосферу Земли и закреплять их в пространстве в районе мировых магнитных аномалий.

Магнитное поле Земли по-разному экранирует потоки ГКЛ и СКЛ, поступающие в низкие и высокие широты, а также постоянно изменяется. И именно оно является первым "модулятором" и первым звеном в цепочке причинно-следственных связей, которые будут рассмотрены во второй части статьи, что в итоге приводит к изменению радиационного баланса нашей планеты.

Поэтому связь климата с геомагнитным полем нам представляется вполне реальной и, вероятно, геомагнитное поле необходимо учитывать в долгосрочных климатических моделях как один из контролирующих климат факторов.

Выводы. 1. На временных шкалах от десятилетий до столетий наблюдается корреляция между изменениями параметров главного гео-

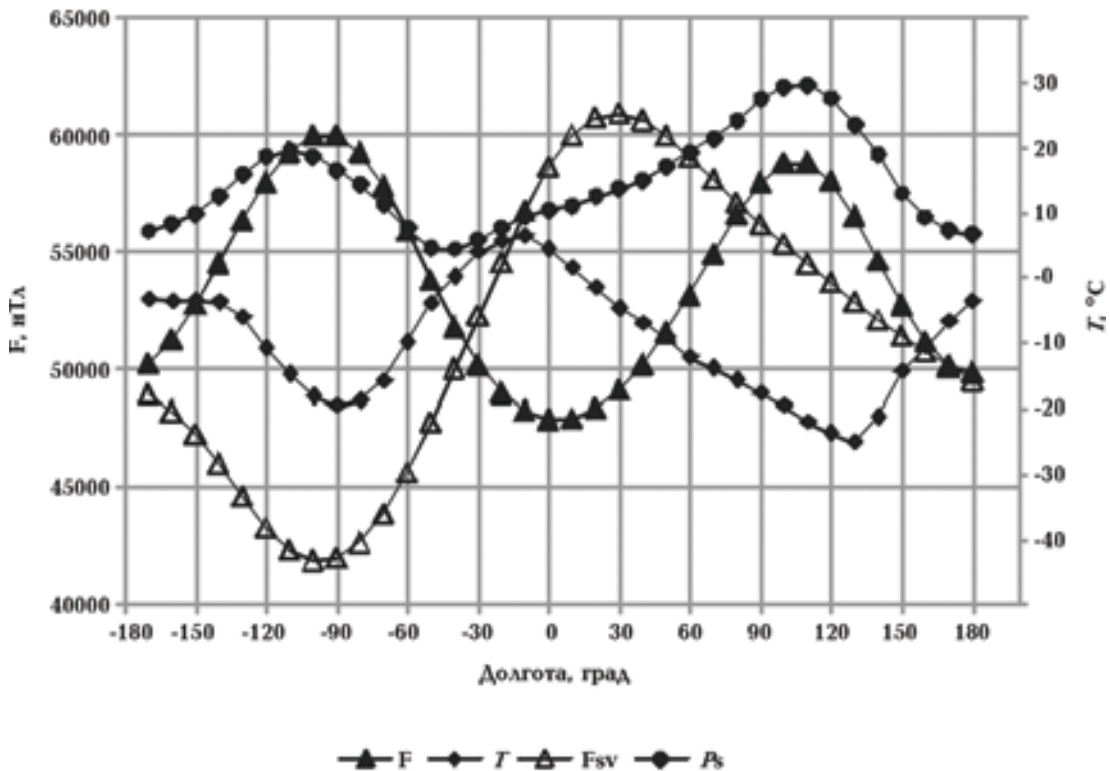


Рис. 14. Интегральные характеристики модуля полного вектора геомагнитного поля F , приземной температуры T , приземного давления P и векового хода F_{sv} в диапазоне широт от 40 до 70° с. ш. в XX в.

магнитного поля и климата. Регулярные инструментальные наблюдения как магнитных, так и климатических параметров редко превышают 100 лет, корреляции между ними в масштабах нескольких последних десятилетий считаются наиболее достоверными, хотя и неожиданными и порой весьма дискуссионными. Наши исследования главного геомагнитного поля и его динамики (по модели IGRF) наряду с климатическими параметрами (приземной температурой воздуха и приземным давлением) позволило проследить их глобальные изменения на протяжении XX в. и выявить пространственно-временную связь между ними.

2. Модуляция и рассеивание потоков ГКЛ (и СКЛ), вторгающихся в земную атмосферу, связаны не только с гелиомагнитными полями, но и зависят от главного магнитного поля Земли. В рамках гипотез влияния солнечной активности на атмосферные и климатические параметры сегодня многими исследователями ГКЛ и СКЛ рассматриваются как основные космические агенты, способные проникать в глубокие слои атмосферы (несмотря на сравнительно ничтожно малый вклад по отношению к волновому излучению Солнца). Здесь основными проблемами являются установление достоверных корреляционных связей и такого влияния. Что характерно для многих предлагаемых механизмов — это присутствие электромагнитной компоненты либо прямое указание на роль магнитных полей разного происхождения (разных источников). Основная роль в глобальных реконструкциях отводится главному магнитному полю Земли как первому звену причинно-следственных связей цепочки магнитное поле — климат.

3. Все расчеты для геомагнитного поля, полей приземной температуры и давления проведены по единой методике для широтного пояса 40—70° с. ш., приведены в узлах регулярной сетки с шагом по широте и долготе 10°, по времени охватывают XX в., шаг дискретизации 10 лет. Проанализированы как интегральные характеристики, так и динамика различных полей, что позволяет выделить региональные и глобальные особенности и дать им соответствующее толкование (в рамках наблюдаемых на земной поверхности долговременных трендов).

4. В пространственно-временной структуре магнитного поля XX в. выделяются три интервала (с начала столетия до середины 1930-х годов, с середины 30-х до середины 60-х годов, с конца 60-х до настоящего времени), характеризующиеся разным поведением геомагнит-

ного поля. Эти интервалы согласуются с тремя периодами изменения глобальной температуры: первое глобальное потепление (1911—1943), которое характеризуется интенсивным повышением температуры; период стабилизации — с конца 40-х до начала—середины 70-х годов; второе глобальное потепление — с начала—середины 70-х годов до настоящего времени, когда происходит интенсивный подъем температуры с рекордными значениями в последние десятилетия. Признавая, что в выделении трех периодов по F и T присутствует элемент субъективности (особенно в определении границ между ними, учитывая, что мы оперируем средне-декадными значениями), такая закономерность четко прослеживается — в изменениях структуры векового хода геомагнитного поля и изменениях глобальной температуры выделяются подобные периоды (около 30 лет). Здесь есть перспектива для дальнейших исследований, которые можно выполнять как путем детализации (особенно во второй половине XX в.), так и привлечением исторических и палеоданных (за последние несколько сот — первые тысячи лет, где фактический материал наименее спекулятивный).

5. Визуально местоположение основных структур геомагнитного поля, барического поля и поля температур в Северном полушарии совпадает. При сопоставлении их интегральных характеристик очевидно, что их минимумы и максимумы достаточно хорошо совпадают. Высокий коэффициент подобия интегральных столетних кривых F и T ($R_{FT} = -0,83$) довольно неожиданный. Не исключено, что это просто случайное совпадение. Однако, учитывая методику, по которой был получен и обработан фактический материал, трудно представить, что такая корреляция является случайной. Если причинно-следственная связь существует, то очевидно, что геомагнитное поле каким-то образом влияет на температуру (либо давление), но никак наоборот.

6. Корреляция разных параметров сама по себе недостаточна, чтобы продемонстрировать причинно-следственные связи. Механизмы, посредством которых геомагнитное поле может влиять на климат на разных временных масштабах, мало изучены и являются основной проблемой. Рассмотренный нами фактический материал, основанный на результатах прямых инструментальных наблюдений за последние столетия, служит хорошей базой для ориентации в направлении дальнейших исследований причинно-следственных связей, чему посвящена

вторая часть статьи. Связь климата с геомагнитным полем нам представляется вполне реальной, а геомагнитное поле также необходимо учитывать в долгосрочных климатических моделях как один из контролирующих климат факторов.

Работа выполнена в рамках проекта Black-SeaHazNet FP7 (PIRSES-GA-2009-246874). Авторы благодарят проект ERA-40 и ERA-Interim за данные реанализа, а также World Data Center for Geomagnetism, Kyoto за возможность использования коэффициентов IGRF.

Список литературы

- Авдюшин С.И., Данилов А.Д. Солнце, погода и климат: сегодняшний взгляд на проблему (обзор). *Геомагнетизм и аэрономия*. 2000. Т. 40, №5. С. 3—14. [Avdjushin S.I., Danilov A.D., 2000. Sun, weather and climate: a contemporary view of the problem (Review). *Geomagnetizm i ajeronomija* 40(5), 3—14 (in Russian)].
- Бахмутов В.Г. Палеоэпохальные геомагнитные вариации. Киев: Наук. думка, 2006. 298 с. [Bakhtutov V.G., 2006. Paleo-secular geomagnetic variations. Kiev: Naukova Dumka, 298 p. (in Russian)].
- Бахмутов В.Г., Мартазинова В.Ф., Иванова Е.К., Мельник Г.В. Изменения главного магнитного поля и климата в XX веке. Доп. НАНУ. Науки про Землю. 2011. № 7. С. 90—94. [Bakhtutov V.G., Martazinova V.F., Ivanova E.K., Mel'nik G.V., 2011. Changes to the main magnetic field and climate in the twentieth century. *Dopovidi Akad. Nauk Ukrainy* 7, 90—94 (in Russian)].
- Бондарь Т.Н., Головков В.П., Яковлева С.В. Магнитное поле Земли в XX веке. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2006. Т. 46, № 3. С. 409—422. [Bondar' T.N., Golovkov V.P., Jakovleva S.V., 2006. Earth's magnetic field in the XX century. *Geomagnetizm i ajeronomija* 46(3), 409—422 (in Russian)].
- Бондарь Т.Н., Головков В.П., Яковлева С.В. Региональные особенности векового хода геомагнитного поля. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2008. Т. 48, № 4. С. 553—560. [Bondar' T.N., Golovkov V.P., Jakovleva S.V., 2008. Regional features of the secular variation of the geomagnetic field. *Geomagnetizm i ajeronomija* 48(4), 553—560 (in Russian)].
- Веретененко С.В., Пуговкин М.И. Вариации прихода суммарной радиации как возможный энергетический источник долгопериодных эффектов солнечной активности в атмосферной циркуляции. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2000. 40, № 1. С. 77—83. [Veretenenko S.V., Pudovkin M.I., 2000. Variations of the arrival of the total radiation as a possible energy source of long-term effects of solar activity in the atmospheric circulation. *Geomagnetizm i ajeronomija*, 40(1) 77—83 (in Russian)].
- Веретененко С.В., Пуговкин М.И. Эффекты вариаций космических лучей в циркуляции нижней атмосферы. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1993. Т. 33, № 6. С. 35—39. [Veretenenko S.V., Pudovkin M.I., 1993. Effects of cosmic ray variations in the circulation of the lower atmosphere. *Geomagnetizm i ajeronomija* 33(6), 35—39 (in Russian)].
- Витинский Ю.И., Оль А.И., Сазонов Б.И. Солнце и атмосфера Земли. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1976. 351 с. [Vitinskij Ju.I., Ol' A.I., Sazonov B.I., 1976. Sun and Earth's atmosphere. Leningrad: Gidrometeoizdat, 351 p. (in Russian)].
- Демина И.М., Никитина Л.В., Фарафонова Ю.Г. Вековые вариации главного магнитного поля Земли в рамках динамической модели его источников. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2008. Т. 48, № 4. С. 567—575. [Demina I.M., Nikitina L.V., Farafonova Ju.G., 2008. The secular variations of the main magnetic field of the Earth within a dynamic model of its sources. *Geomagnetizm i ajeronomija*, 48(4), 567—575 (in Russian)].
- Мартазинова В.Ф., Бахмутов В.Г. К вопросу о связи геомагнитной активности и атмосферной циркуляции. *Геофиз. журн.* 2006. Т. 28, № 4. С. 135—139. [Martazinova V.F., Bakhtutov V.G., 2006. On the question of the relationship of geomagnetic activity and atmospheric circulation. *Geofizicheskij zhurnal* 28(4), 135—139 (in Russian)].
- Мартазинова В.Ф., Иванова Е.К. Характерные особенности синоптических процессов различной вероятности конца XX — начала XXI столетий. В кн.: *Глобальные и региональные изменения климата*. Киев: Ника-Центр, 2011. С. 86—95. [Martazinova V.F., Ivanova E.K., 2011. Characteristic features of the synoptic processes of different probabilities of the late twentieth — beginning of the XXI century. In: *Global and*

- regional climate changes*. Kiev: Nika-Centr, 86—95 (in Russian)].
- Мартазинова В.Ф., Свердлик Т.А. Крупномасштабная атмосферная циркуляция XX столетия, ее изменения и современное состояние. *Тр. УкрНИГМИ*. 1998. Вып. 246. С. 21—27. [Martazinova V.F., Sverdlik T.A., 1998. Large-scale atmospheric circulation of the twentieth century, its changes and current status. *Trudy UkrNIGMI*, is. 246, 21—27 (in Russian)].
- Пудовкин М.И. Влияние солнечной активности на состояние нижней атмосферы и погоду. *Соросов. образоват. журн.* 1996. № 10. С. 106—113. [Pudovkin M.I., 1996. Influence of solar activity on the state of the lower atmosphere and weather. *Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal* 10, 106—113 (in Russian)].
- Пудовкин М.И., Распопов О.М. Механизм влияния солнечной активности на состояние нижней атмосферы и метеопараметры. Геоматизм и аэрономия. 1992. Е. 32, № 5. С. 1—22. [Pudovkin M.I., Raspopov O.M., 1992. Mechanism of the influence of solar activity on the state of the lower atmosphere and meteorological parameters. *Geomagnetizm i ajeronomija* 32(5), 1—22 (in Russian)].
- Bakmutov V., 2006. The connection between geomagnetic secular variation and long-range development of climate changes for the last 13,000 years: the data from NNE Europe. *Quaternary Int.* 149. 4—11. doi:10.1016/j.quaint.2005.11.013.
- Bard E., Delaygue G., 2007. Comment on "Are there connections between Earth's magnetic field and climate?" by Courtillot, V., Gallet, Y., Le Mouëll, J.L., Fluteau, F., and Genevey, A., *Earth Planet. Sci. Lett.*, 253, 328—339, 2007. *Earth Planet. Sci. Lett.* 265, Is. 1-2, 302—307.
- Bard E., Frank M., 2006. Climate change and solar variability: what's new under the sun? *Earth Planet. Sci. Lett.* 248, 1—14.
- Bard E., Raisbeck G., Yiou F., Jouzel J., 2000. Solar irradiance during the last 1200 yr based on cosmogenic nuclides. *Tellus, Ser. B Chem. Phys. Meteorol.* 52, 985—992.
- Brohan P., Kennedy J.J., Harris I., Tett S.F.B., Jones P.D., 2006. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850. *J. Geophys. Res.* 111, D12106. doi:10.1029/2005JD006548.
- Bucha V., 1988a. Influence of corpuscular radiation on changes in the middle atmosphere and troposphere. *Adv. Space Res.* 8(2), (7) 205—(7) 210.
- Bucha V., 1988b. Influence of solar activity on atmospheric circulation types. *Ann. Geophys.*, 6(5), 513—524.
- Bucha V., Bucha V. Jr., 1998. Geomagnetic forcing of changes in climate and in the atmospheric circulation. *J. Atmos. Sol.-Ter. Phys.* 60(2), 145—169.
- Calisto M., Usoskin I., Rozanov E., Peter T., 2011. Influence of galactic cosmic rays on atmospheric composition and temperature. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 11, 653—679.
- Carlsaw K.S., Harrison R.G., Kirkby J., 2002. Cosmic rays, clouds and climate. *Science* 298, 1732—1737.
- Chapman W.A., Cross M.J., Flower D.A., Peckham G.E., Smith S.D., 1974. A spectral analysis of global atmospheric temperature fields observed by the selective chopper radiometer on the Nimbus 4 satellite during the year 1970. *Proc. Roy. Soc.* A338, № 1612, 67—76.
- Cliver E.W., Boriakoff V., Feynman J., 1998. Solar variability and climate change: geomagnetic aa index and global surface temperature. *Geophys. Res. Lett.* 25, 1035—1038.
- Courtillot V., Gallet Y., Le Mouëll J.L., Fluteau F., Genevey A., 2008. Response to Comment on "Are there connections between Earth's magnetic field and climate? *Earth Planet. Sci. Lett.*, 253, 328—339, 2007" by Bard, E., and Delaygue, M., *Earth Planet. Sci. Lett.*, in press, 2007. *Earth Planet. Sci. Lett.* 265, 308—311.
- Courtillot V., Gallet Y., Le Mouëll J.L., Fluteau F., Genevey A., 2007. Are there connections between Earth's magnetic field and climate? *Earth Planet. Sci. Lett.* 253, 328—339.
- Courtillot V., Le Mouëll J.L., Ducruix J., Cazenave A., 1982. Geomagnetic secular variation as a precursor of climatic change. *Nature* 297, 386—387.
- Crowley T.J., 2000. Causes of climate change over the past 1000 years. *Science* 289, 270—277.
- Doake C.S.M., 1978. Climatic change and geomagnetic field reversals: A statistical correlation. *Earth Planet. Sci. Lett.* 38(2), 313—318.
- Douglass D.H., Clader B.D., 2002. Climate sensitivity of the Earth to solar irradiance. *Geophys. Res. Lett.* 29(16), 1786. doi:10.1029/2002GL015345.

- El-Borie M.A., Al-Thoyaib S.S.*, 2006. Can we use geomagnetic activity index to predict partially the variability in global mean temperature? *Int. J. Phys. Sci.* 1(2), 67—74.
- Elias A.G., Zossi de Artigas M., de Haro Barbas B.F.*, 2010. Trends in the solar quiet geomagnetic field variation linked to the Earth's magnetic field secular variation and increasing concentrations of greenhouse gases. *J. Geophys. Res.* 115, A08316. doi:10.1029/2009JA015136.
- Foukal P.A.*, 2002. Comparison of variable solar total and ultraviolet irradiances in the 20th century. *Geophys. Res. Lett.* 29(23), 2107—2110. doi: 10.1029/2002GL015474.
- Foukal P., Fröhlich C., Spruit H., Wigley T.M.L.*, 2006. Variations in solar luminosity and their effect on the Earth's climate. *Nature* 443, 161—166.
- Friis-Christensen E., Lassen K.*, 1991. The length of the solar cycle: an indicator of solar activity closely associated with climate. *Science* 254, 698—700.
- Gallet Y., Genevey A., Courtillot V.*, 2003. On the possible occurrences of "archeomagnetic jerks" in the geomagnetic field over the past three millennia. *Earth Planet. Sci. Lett.* 214, 237—242.
- Gallet Y., Genevey A., Fluteau F.*, 2005. Does Earth's magnetic field secular variation control centennial climate change? *Earth Planet. Sci. Lett.* 236, 339—347.
- Gerhard W.G., Livingstone D.M., Masarik J., Muscheler R., Beer J.*, 2001. Some results relevant to the discussion of a possible link between cosmic rays and Earth's climate. *J. Geophys. Res.* 106(D4), 3381—3387.
- Haigh J.D.*, 2003. The effect of solar variability on the Earth's climate. *Philos. Trans. R. Soc. London.* A361, 95—111.
- Kiehl J.T., Trenberth K.E.*, 1997. Earth's annual global mean energy budget. *Bull. Amer Meteorol. Soc.* 78(2), 197—208.
- Kerton A.K.*, 2009. Climate change and the Earth's magnetic poles, a possible connection. *Energy & Environment* 20(1-2), 75—83.
- Kilifarska N.A.*, 2012. Climate sensitivity to the lower stratospheric ozone variations. *J. Atmos. Sol-Ter. Phys.* 90-91, 9—14.
- Kilifarska N.A., Bakmutov V.G., Mel'nyk G.V.*, 2013. Geomagnetic influence on Antarctic Climat — Evidences and Mechanism. *Int. Rev. Physics* 7(3), 242—252.
- Kirkby J.*, 2007. Cosmic rays and climate. *Surv. Geophys.* 28, 333—375.
- Kitaba I., Masayuki Hyodoa, Shigehiro Katohb, David L. Dettmanc, Hiroshi Satod.*, 2013. Midlatitude cooling caused by geomagnetic field minimum during polarity reversal. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* 110(4), 1215—1220.
- Kovaltsov G.A., Usoskin I.G.*, 2007. Regional cosmic ray induced ionization and geomagnetic field changes. *Adv. Geosci.* 13, 31—35.
- Kristjansson J.E., Kristiansen J., Kaas E.*, 2004. Solar activity, cosmic rays, clouds and climate — an update. *Adv. Space Res.* 34, 407—415.
- Le Mouél J.L., Kossobokov V., Courtillot V.*, 2005. On long-term variations of simple geomagnetic indices and slow changes in magnetospheric currents. The emergence of anthropogenic global warming after 1990? *Earth Planet. Sci. Lett.* 232, 273—286.
- Lean J., Rind D.*, 2001. Earth's response to a variable sun. *Science* 292, 234—236.
- Lockwood M., Fröhlich C.*, 2007. Recent oppositely directed trends in solar climate forcings and the global mean surface air temperature. *Proc. R. Soc. A*, 1—14. doi:10.1098/rspa.2007.1880.
- Lockwood M.*, 2012. Solar Influence on Global and Regional Climates. *Surv Geophys.* 33, 503—534.
- Love J.J., Mursula K., Tsai V.C., Perkins D.M.*, 2011. Are secular correlations between sunspots, geomagnetic activity, and global temperature significant? *Geophys. Res. Lett.* 38, L21703. doi:10.1029/2011GL049380.
- Mufti S., Shah G. N.*, 2011. Solar-geomagnetic activity influence on Earth's climate. *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.* 73(13), 1607—1615.
- Ney E.P.*, 1959. Cosmic radiation and the weather. *Nature* 183, 451—452.
- Olsen N., Manda M.*, 2007. Will the Magnetic North Pole Move to Siberia? *Eos Trans. AGU* 88(29), 293—300.
- Pudovkin M.I., Veretenenko S.V.*, 1997. Effects of the galactic cosmic ray variations on the solar

- radiation input in the lower atmosphere. *J. Atmos. Sol.-Ter. Phys.* 59 (14), 1739—1746.
- Pulkkinen T.I., Nevanlinna H., Pulkkinen P.J., Lockwood M., 2001. The Sun-Earth connection in time scales from years to decades and centuries. *Space Sci. Rev.* 95, 625—637.
- Reid G.C., 1987. Influence of solar variability on global sea-surface temperatures. *Nature* 329(6135), 142—143.
- Reid G.C., 1991. Solar total irradiance variations and the global sea-surface temperature record. *J. Geophys. Res.* 96 (D2), 2835—2844.
- Reid G.C., 2000. Solar Variability and the Earth's Climate: Introduction and Overview. *Space Sci. Rev.* 94 (Is. 1-2), 1—11.
- Scafetta N., West B.J., 2006. Phenomenological solar contribution to the 1900—2000 global surface warming. *Geophys. Res. Lett.* 33, L05708. doi:10.1029/2005GL025539.
- Sharma M., 2002. Variations in solar magnetic activity during the last 200000 years: is there a Sun — climate connection? *Earth Planet. Sci. Lett.* 199, 459—472.
- Shea M.A., Smart D.F., 2004. Preliminary study of cosmic rays, geomagnetic field changes and possible climate changes. *Adv. Space. Res.* 34(2), 420—425.
- Solanki S.K., Schüssler M., Fligge M., 2002. Secular variation of the Sun's magnetic flux. *Astron. Astrophys.* 383, 706—712.
- Solanki S.K., Krivova N.A., 2003. Can solar variability explain global warming since 1970? *J. Geophys. Res.* 108 (A5), 1200. doi:10.1029/2002JA009753.
- Solanki S.K., Schüssler M., Fligge M., 2000. Evolution of the Sun's large scale magnetic field since the Maunder minimum. *Nature* 408, 445—447.
- Solanki S.M., Krivova N., 1999. A reconstruction of total solar irradiance since 1700. *Geophys. Res. Lett.* 26, 2465—2468.
- Souza-Echer M.P.S., Echer E., Rigozo N.R., Brum C.G.M., Nordemann D.J.R., Gonzalez W.D., 2012. On the relationship between global, hemispheric and latitudinal averaged air surface temperature (GISS time series) and solar activity. *J. Atmos. Sol.-Ter. Phys.*, 74, 87—93.
- Souza-Echer M.P., Gonzalez W.D., Echer E., Nordemann D.J.R., Rigozo N.R., 2011. Long term relation between solar activity and surface temperature at different geographical regions. In: *Comparative Magnetic Minima: Characterizing quiet times in the Sun and Stars: Proc. IAU Symposium* (286) 418—422.
- Stauning P., 2011. Solar activity — climate relations: A different approach. *J. Atmos. Sol.-Ter. Phys.* 73, 1999—2012
- Svensmark H., 2000. Cosmic rays and Earth's climate. *Space Sci. Rev.* 93, 175—185.
- Svensmark H., 1998. Influence of cosmic rays on Earth's climate. *Phys. Rev. Lett.* 81, 5027—5030.
- Svensmark H., Friis-Christensen E., 1997. Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage — a missing link in solar — climate relationships. *J. Atmos. Sol.-Ter. Phys.* 59, 1225—1232.
- Tinsley B.A., 1996. Correlations of atmospheric dynamics with solar wind-induced changes of air-Earth current density into cloud tops. *J. Geophys. Res.* 101, Is. D23, 29701—29714.
- Tinsley B.A., Hoeksema J.T., Baker D.N., 1994. Stratospheric volcanic aerosols and changes in air-earth current density at solar wind magnetic sector boundaries as conditions for the Wilcox tropospheric vorticity effect. *J. Geophys. Res.* 99(D8), 16,805—16,813.
- Usoskin I.G., Desorgher L., Velinov P., Storini M., Flückiger E., Büttikofer R., Kovaltsov G., 2009. Ionization of the Earth's Atmosphere by Solar and Galactic Cosmic Rays. *Acta Geophys.* 57(1), 88—101.
- Usoskin I.G., Schüssler M., Solanki S.K., Mursula M., 2005. Solar activity, cosmic rays, and Earth's temperature: a millennium scale comparison. *J. Geophys. Res.* 110 (A10102). doi:10.1029/2004JA010946.
- Usoskin I.G., Solanki S.K., Schüssler M., Mursula K., Alanko K., 2003. A millennium scale sunspot number reconstruction: evidence for an unusually active Sun since the 1940's. *Phys. Rev. Lett.* 91. doi:10.1103/PhysRevLett.91.211101.
- Valev D., 2006. Statistical relationships between the surface air temperature anomalies and the solar and geomagnetic activity indices. *Phys. Chem. Earth.* 31, 109—112.
- Vieira L.E.A., da Silva L.A., 2006. Geomagnetic modulation of clouds effects in the Southern Hemisphere Magnetic Anomaly through lower atmo-

- sphere cosmic ray effects. *Geophys. Res. Lett.* 33. doi:10.1029/2006GL026389.
- Vieira L.E.A., da Silva L.A., 2008.* Are changes of the geomagnetic field intensity related to changes of the tropical Pacific sea-level pressure during the last 50 years? *J. Geophys. Res.* 1139 (A08 226).doi:10.1029/2008JA013052.
- White W.B., Lean J., Cayan D.R., Dettinger M.D., 1997.* Response of global upper ocean temperature to changing solar irradiance. *J. Geophys. Res.* 102 (C2), 3255—3266.
- Wilson R.M., 1998.* Evidence for solar-cycle forcing and secular variation in the Armagh observatory temperature record 1844—1992. *J. Geo-phys. Res.* 103 (D10), 11159—11171.
- Wenyao X.U., Zigang W.E.I., Shizhuang M.A., 2000.* Dramatic variations in the Earth's main magnetic field during the 20th century. *Chinese Sci. Bul.* 45 (21), 2013—2016.