

ВЛИЯНИЕ ДВИЖЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЮСОВ ЗЕМЛИ НА СТРУКТУРУ И ДИНАМИКУ ИОНОСФЕРЫ И ТЕРМОСФЕРЫ

А.Н. Ляхов, Ю.И. Зецер, Т. Фуллер-Роуэлл

INFLUENCE OF MOTION OF THE EARTH'S MAGNETIC POLES ON THE IONOSPHERE AND THERMOSPHERE STRUCTURE AND DYNAMICS

A.N. Lyakhov, Yu.I. Zetser, T. Fuller-Rowell

В лекции представлены результаты численного моделирования перестройки структуры ионосферы и термосферы Земли при движении магнитных полюсов. Смещение зоны авроральной ионизации и нагрева ионосферными токами меняет структуру и динамику верхней атмосферы Земли и отклик ионосферы на магнитную активность. Реанализ на период 1900–2005 гг. показал, что движение магнитных полюсов вызывает появление трендов параметров ионосферы и термосферы, сравнимых с наблюдаемыми трендами, ранее объясненными как следствие глобального потепления. Представлены результаты сопоставления климатических данных за 20 век с данными магнитометрии. Обсуждаются возможные контуры межгеосферных связей.

The lecture presents the results of computational modeling of the structure modification of the Earth's ionosphere and thermosphere as magnetic dip poles move. The shift of zone of the auroral ionization and heating by ionospheric currents changes the structure and dynamics of the upper atmosphere and the ionosphere response to the magnetic activity. As shown by the reanalysis for 1900–2005 the motion of magnetic poles causes ionospheric trends in ionospheric and thermospheric parameters comparable with observed trends explained earlier as a consequence of greenhouse effect. The results are presented of comparison between climatic data for the 20th century and magnetometry data. Possible intergeospheric relationships are discussed.

1. Движение магнитных полюсов

Магнитные полюса Земли не являются чем-то неподвижным. Магнитное поле постоянно меняется, что фиксируется современной аппаратурой. Согласно палеомагнитным данным, в прошлом бывали периоды смены полярности магнитного поля и периоды исчезновения (ослабления) магнитного поля до нуля. На рис. 1 приведены положения Северного магнитного полюса (СМП) за период с 1620 по 2001 г. Кружками отмечены положения магнитного полюса, реконструированные по архивным навигационным данным, звездочками – определенные в 20 в. с помощью магнитометрических станций. Из рис. 1 видно, что периоды блуждания и торможения сменялись периодами практически прямолинейного движения (1760–1820 гг. и с 1904 – по настоящее время).

С 70-х гг. 20 в. скорость и ускорение движения СМП начали резко расти, более чем в два раза за последние 30 лет (до 46 км/год) [1]. Скорость смещения Южного магнитного полюса (ЮМП) в этот же период стала уменьшаться, и с 1986 г. его движение практически прекратилось (рис. 2). «Блуждание» по территории Северной Канады сменилось устойчивым, практически прямолинейным движением в направлении российского сектора Арктики с линейно нарастающим ускорением. Экстраполяция координат СМП при сохранении существующего тренда предсказывает, что к 2050 г. СМП будет располагаться в районе архипелага Северная Земля.

Перемещение магнитных полюсов вызывает целый ряд физических последствий в атмосфере и ионосфере Земли. Физический механизм такого воздействия – изменение баланса энергии в атмосфере.

Существующая структура ионосферы и термосферы Земли отражает динамическое равновесие между поступлением энергии солнечного излучения, зависящим от географических координат и вводом энергии из магнитосферы с потоками энергичных заряженных частиц в зоне аврорального овала [2],

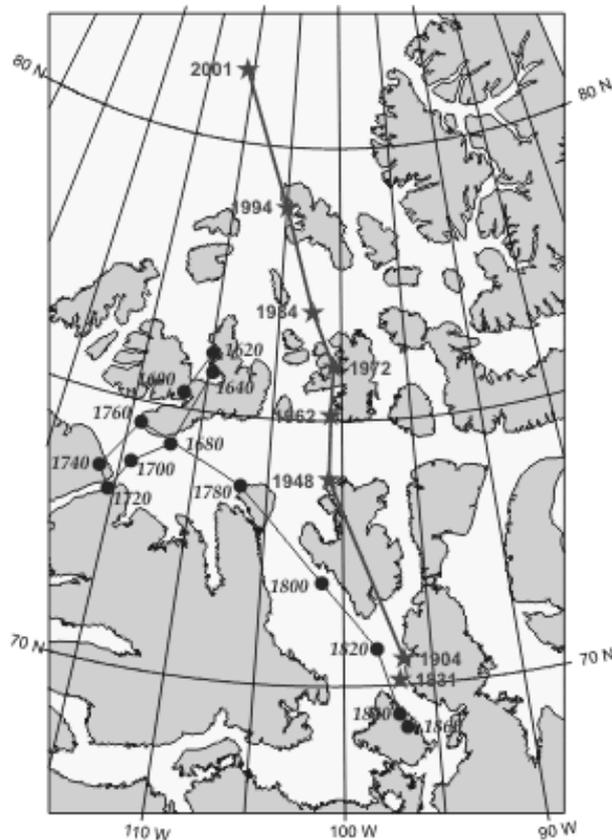


Рис. 1. Траектория движения Северного магнитного полюса за период инструментальных наблюдений (звездочки) и реконструированные по архивным навигационным данным положения магнитного полюса (кружки).

зависящим от геомагнитных координат места. Смещение магнитных полюсов приведет к следующему:

- изменится баланс солнечной и корпускулярной ионизации;
- в средних широтах в сместившейся авроральной зоне будет происходить интенсивный рост ионизации в Е-слое, что окажет прямое влияние на распространение радиоволн (это важно для прогно-

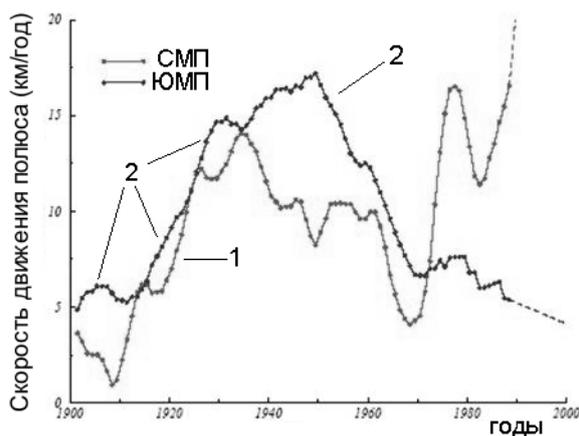


Рис. 2. Скорость движения Северного магнитного полюса (кривая 1) и Южного магнитного полюса (кривая 2) в 1900–2000 гг.

зируемого на 2050 г. смещения СМП);

в) новая пространственная структура конвекции плазмы изменит формирование и положение главного ионосферного провала;

г) максимум интенсивности джоулева нагрева сместится в средние широты, что повлияет на распределение таких параметров нейтральной атмосферы как температура, отношение $[O]/[N_2]$ и вертикальная скорость ветра;

д) изменится система нейтральных ветров и отклик ионосферы на магнитные бури.

При прогнозируемом на 2050 г. положении СМП авроральный овал будет покрывать все крупные города России во время магнитных возмущений. Моделирование влияния смещения полюса [3] только на концентрацию плазмы в ионосфере с использованием одномерной модели [4] показало, что рост N_e будет таким, что в средних широтах критические частоты E-слоя в летние месяцы превысят современные рабочие частоты F2-слоя, что сделает практически невозможной радиосвязь в КВ-диапазоне. Уровень наших сегодняшних знаний о механизмах генерации магнитного поля Земли совершенно недостаточен для сколько-нибудь надежного прогноза положения магнитных полюсов. В любой момент СМП может развернуться и двинуться в другом направлении. Особый интерес представляет задача о том, как движение магнитных полюсов с 1900 по 2005 г. проявляется в изменениях параметров верхней атмосферы (иначе говоря, в появлении трендов, их знаке и величине). Результаты реанализа представлены в Разделе 3.

2. Последствия макросмещения магнитного полюса

Моделирование глобальной перестройки структуры и динамики верхней атмосферы Земли при смещении магнитного полюса выполнено с использованием трехмерной самосогласованной модели ионосферы и термосферы СТИМ [5]. Это самосогласованная полностью нелинейная модель, позволяющая рассчитывать ветра, концентрации и температуры как нейтральной компоненты, так и заряженной, с разрешением 2° по широте на 18° по долготе с

15 слоями по высоте. Параметризация авроральных высыпаний выполнена с использованием модели TIROS-NOAA и учитывает зависимость параметров овала от магнитной активности. Координаты СМП на 2050 г. оценены нами как $75^\circ N$, $125^\circ E$. Положение ЮМП было заморожено на момент, соответствующий 2000 г. [1]. Расчеты при текущем и прогнозируемом положении СМП выполнены для четырех сезонов (зима, весна, лето, осень) при слабой магнитной активности ($K_p=2$) и умеренной солнечной активности ($F10.7=120$). Для зимы (9 декабря) был дополнительно выполнен расчет для случая сильной магнитной бури ($K_p=7+$), продолжительностью 12 ч. На рис. 3, а, б представлено распределение NmF2 (интегральная величина, зависящая от источников ионизации, температуры, нейтрального состава и ветра) для весеннего равноденствия на 00:00 UT. Главная конвективная ячейка смещается на дневную сторону, вызывая дополнительный рост концентрации электронов, и полярная ионосфера сливается со среднеширотной. Изменяется схема контроля ионосферы мировым временем и формирования главного ионосферного провала [6]. На дневной стороне распределение hmF2 качественно меняется и в целом F2-слой поднимается на 20–30 км, что вызвано усилением нагрева.

Сравнение результатов в разные сезоны и в разные моменты времени показало, что качественно картина воспроизводится со сдвигом примерно на 12 ч. Однако смещение СМП не ведет к симметричному смещению авроральной зоны в новое положение. Изменение фазового сдвига между магнитным и солнечным локальным временем ведет к тому, что при качественной схожести распределения параметров ионосферы все же различаются и количественно и по структуре. Различия максимально в равноденственные периоды и минимально летом, во всяком случае, в магнитоспокойных условиях.

Расчеты токовой системы показали, что самые мощные токи при сместившемся магнитном полюсе будут течь над территорией Восточной Сибири, а во время магнитных бурь они будут смещаться почти до $40^\circ N$.

Моделирование магнитной бури показало, что в вечерние часы концентрация электронов над севером Восточной Сибири будет на порядок выше ныне существующей. В этой же зоне наблюдается практически полное исчезновение F2-слоя, что вызвано интенсивным нагревом нейтральной атмосферы и изменением отношения $[O]/[N_2]$. Изменения нейтрального ветра будут максимальны в средних широтах Северной Америки, над Атлантикой и югом Западной Европы. Из возможных техногенных последствий смещения СМП укажем следующие: полное изменение условий КВ-радиосвязи над территорией России; нарушение работы спутниковых навигационных систем, так как они используют алгоритмы ионосферной коррекции, построенные на эмпирических моделях, применимость которых станет невозможной.

3. Тренды параметров верхней атмосферы, вызванные движением магнитных полюсов

Долговременные тренды параметров термосферы

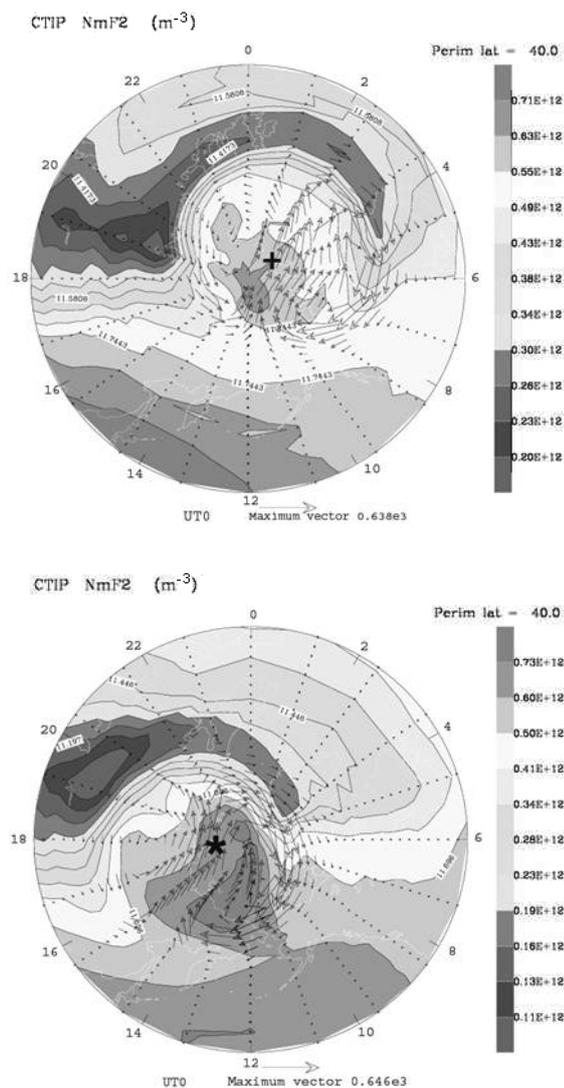


Рис. 3. Распределение концентрации электронов в максимуме F2-слоя при текущем положении Северного магнитного полюса (вверху) и при его положении в 2050 г. (внизу).

и ионосферы Земли активно изучаются на протяжении последних 20 лет. Хотя по абсолютной величине тренды ионосферных параметров (f_0F2 и $hmF2$) и невелики, и не имеют прикладного значения, они могут служить важным индикатором долговременных изменений в атмосфере Земли. Изучению трендов ионосферы была посвящена программа Евросоюза COST251, основные результаты которой представлены в работах [8–10]. Использовались данные 53 станций ионосферного зондирования для получения трендов критической частоты слоя F2 и 50 станций для выведения трендов высоты слоя F2. Влияние солнечной активности устранялось по методике, описанной в [10]. Медианное значение тренда для f_0F2 равно -0.001 МГц/год, и для $hmF2$ – 0.009 км/год. Основные морфологические характеристики трендов ионосферы таковы: 1) пространственное распределение трендов весьма неоднородно, на отдельных станциях тренд существенно больше, на некоторых он меняет свой знак; 2) знак тренда зависит от фазы (рост/спад) магнитной активности [10]; 3) величина тренда f_0F2 зависит от геомагнитной ши-

роты: чем выше широта, тем больше значение тренда; 4) отрицательные тренды преобладают в Западной Европе, положительные – восточнее $30-37^\circ$ E.

Тренды термосферы изучались по программе Starshine [11] Naval Research Laboratory. Отслеживались параметры орбит 25-ти ИСЗ, находившихся на орбитах от 200 до 800 км с 1966 по 2001 г. Обработка данных показала, что существует отрицательный тренд плотности атмосферы Земли (10 % за 35 лет). В данных наблюдается высотная зависимость тренда от 1 до 7 % за 10 лет.

К настоящему времени были выдвинуты две гипотезы, касающиеся трендов ионосферы и одна по трендам термосферы. Общая для всей верхней атмосферы гипотеза – это известный парниковый эффект. Рост содержания CO_2 в нижней атмосфере Земли ведет к росту приземной температуры (глобальное потепление) и охлаждению верхней атмосферы, вследствие чего верхняя атмосфера сжимается и газ меньшей плотности переносится на меньшие высоты. Такой сценарий был смоделирован с использованием трехмерного кода TMEGCM и дал результаты, согласующиеся с наблюдениями. Однако, рассматривая верхнюю атмосферу Земли, мы не можем отбрасывать ионосферные данные, а их морфология не может быть удовлетворительно объяснена гипотезой глобального потепления. Если бы дело было только в парниковом эффекте, картина трендов ионосферы была бы однородна, а она имеет резкие различия и чувствительна к магнитной активности. Михайлов [10] выдвинул гипотезу долговременного геомагнитного контроля ионосферных параметров, позволившую объяснить основные морфологические особенности трендов f_0F2 и $hmF2$. Однако некоторые моменты остались необъясненными.

Реанализ на период 1900–2005 гг. выполнялся при замороженной солнечной ($F10.7=120$) и магнитной ($K_p=2$) активности для трех сезонов (зима, весеннее равноденствие и лето). В такой постановке мы выбираем только сезонный эффект и эффект от смещения магнитных полюсов.

Результаты моделирования представлены на рисунках 4–6. Смещение магнитных полюсов дает тренды ионосферных и термосферных параметров того же порядка, что и наблюдаемые, и смоделированные по сценарию глобального потепления. Картина пространственного распределения трендов очень неоднородна и зависит от сезона (рис. 4) и локального времени (рис. 5). Морфологические характеристики (а), (в) и (г) трендов f_0F2 в целом воспроизводятся. Влияние магнитной активности (характеристика (б)) не рассматривалось. Неожиданным оказалось и формирование трендов нейтральной атмосферы (рис. 6). При этом в западном полушарии расчетная величина тренда на 00:00 UT совпадает с полученной из спутниковых данных – те же 10 % за 35 лет. В других секторах тренд имеет другую величину и знак, а наблюдаемые тренды плотности не могут быть объяснены только смещением полюсов, но тот факт, что изменение магнитного поля Земли в состоянии вызвать долговременный тренд термосферы, сопоставимый с наблюдениями,

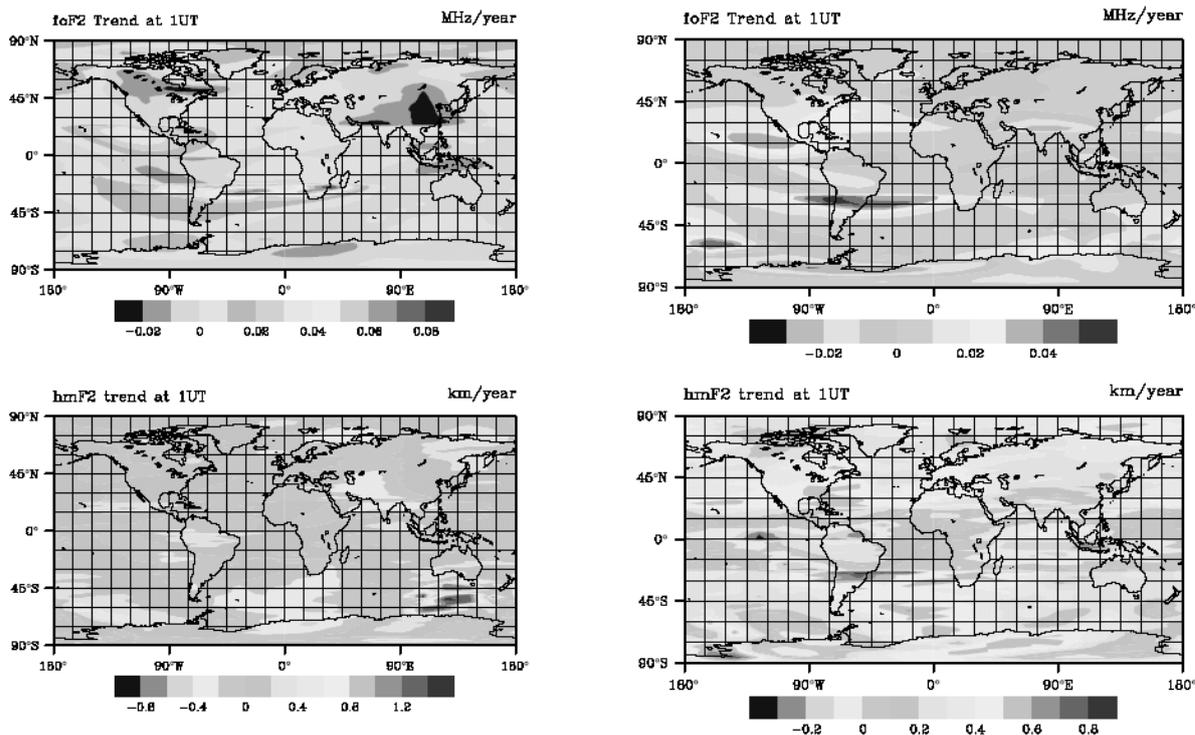


Рис. 4. Тренды ионосферных параметров на 01:00 UT.

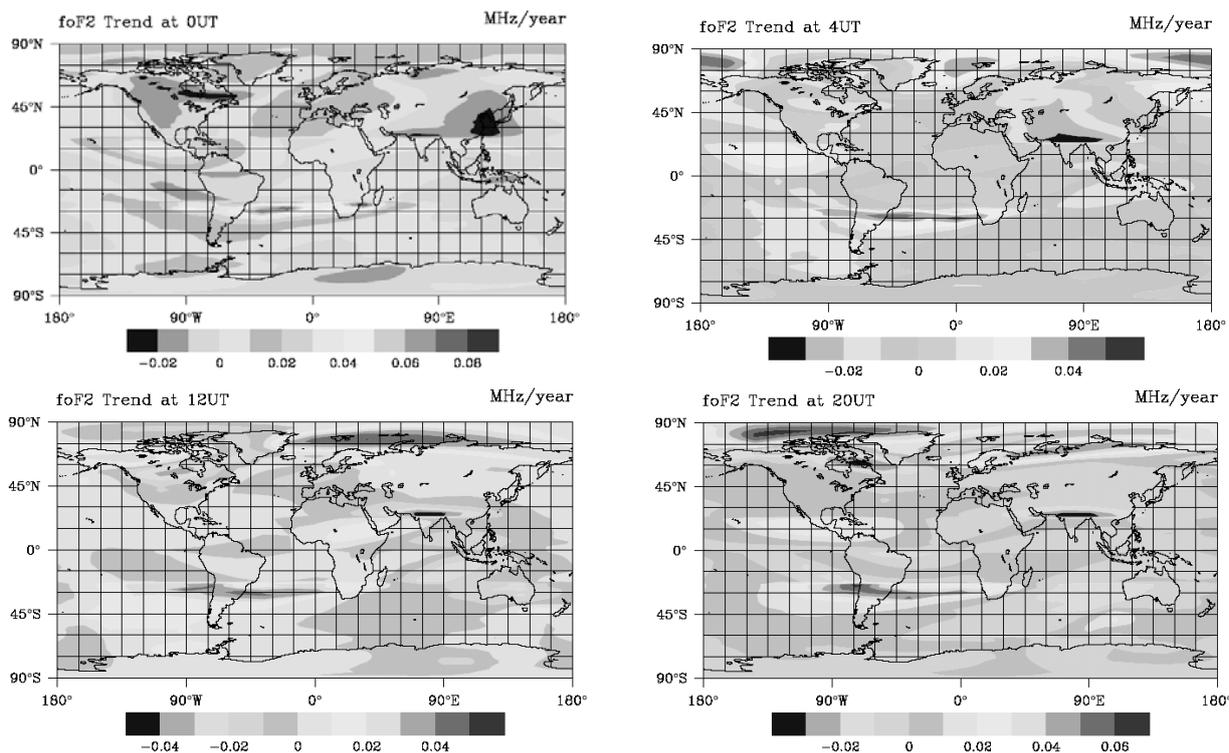


Рис. 5. Суточный ход пространственного распределения трендов в зимний период.

заставляет пересмотреть наши сегодняшние представления о межгеосферных взаимодействиях.

4. Секюлярный ход магнитного поля и парниковый эффект

Если сопоставить известную кривую глобального потепления и секюлярный ход магнитного поля, сразу заметно поразительное сходство этих кривых. Согласно существующим концепциям, рост темпе-

ратуры вызван увеличением содержания парниковых газов (углекислый газ и метан) в приземных слоях атмосферы. Для анализа нами были выбраны 9 станций – измерителей метана, – расположенных в разных широтах. На рис. 7 представлено сопоставление данных по низкоширотной станции Мауна-Лоа, а на рис. 8 – по высокоширотной станции Южный полюс. В низких широтах вариация магнитного поля опережает вариацию содержания метана на

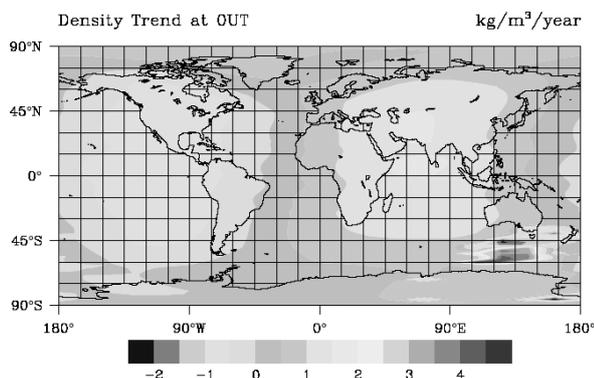


Рис. 6. Пространственное распределение тренда плотности нейтральной атмосферы.

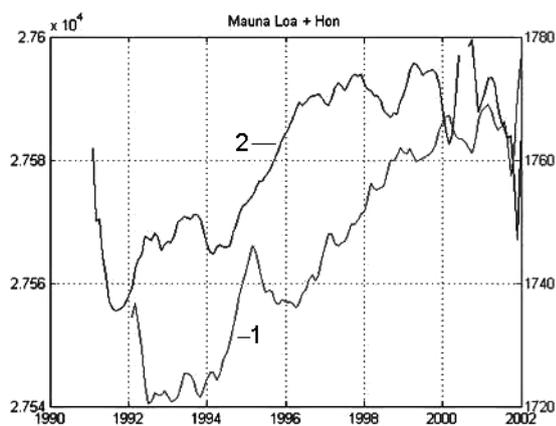


Рис. 7. Изменение содержания метана в приземных слоях на станции Мауна-Лоа (ppbV, кривая 1) и вариация H-компоненты магнитного поля на станции Гонолулу (кривая 2).

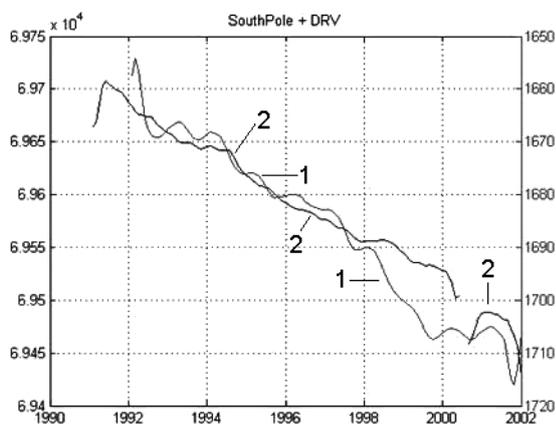


Рис. 8. Изменение содержания метана в приземных слоях на станции Южный полюс (ppbV, кривая 1) и вариация H-компоненты магнитного поля на станции Дюмон-Дюрвиль (кривая 2).

2–3 года, а в высоких широтах кривые полностью коллинеарны! Аналогичная картина наблюдалась и по другим парам станций. Коэффициент корреляции между содержанием метана и ростом температуры равен 0.7 и это считается достаточным для подтверждения гипотезы парникового эффекта. Влияние этого эффекта на верхнюю атмосферу смоделировано и дало хорошее согласие с наблюдениями. Мы

смоделировали влияние хода магнитного поля на верхнюю атмосферу и снова получили согласие с наблюдательными данными. Полученные результаты заставляют задуматься, не является ли кажущееся антропогенное потепление следствием продолжающейся планетарной эволюции.

Рассмотрим возможные контуры связей между геосферами, позволяющие собрать воедино наблюдаемые данные и результаты моделирования. Первичным является наличие глубинных геодинамических процессов в жидком ядре Земли, вызывающих изменение магнитного поля, вследствие чего происходит перестройка структуры и динамики верхней атмосферы и ионосферы Земли, изменяется глобальная картина распределения электрических полей и условия протекания тока в глобальной токовой цепи. Последнее меняет условия транспорта аэрозоля (электрокинетический перенос) и капель воды, что влияет на альбедо Земли и на константы скоростей плазмохимических процессов в средней атмосфере, а это, в свою очередь, влияет на содержание малых возбужденных компонент и озона. Это изменяет энергетический баланс в атмосфере и дает ход климатических параметров, промодулированный солнечной активностью. Одновременно изменение конвекции в жидком ядре ведет к изменению термоупругого состояния земной коры и условий дегазации, при этом происходит рост содержания метана в земной атмосфере, развивается парниковый эффект, рост температуры вызывает охлаждение верхней атмосферы, тренды параметров ионосферы и т. д.

В прошлом Земли периоды глобального потепления и глобального похолодания неоднократно сменяли друг друга, неоднократно происходили и изменения магнитного поля Земли. Как все эти процессы связаны воедино, остается пока нерешенной задачей, но ясно, что ни один аспект геодинамики не может отбрасываться, если мы хотим понять механизмы и путь эволюции Земли как планеты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Manda E., Dormy E. Asymmetric behavior of magnetic dip poles // *Earth, Planets and Space*. 2003. V. 55, N 3. P.153–157.
2. Брюнелли Б.Е., Намгалдзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 210 с.
3. Ляхов А.Н. О возможных последствиях смещения магнитных полюсов Земли // *Динамика взаимодействующих геосфер*. М.: ИДГ РАН, 2004. С. 296–302.
4. Смирнова Н.В., Ляхов А.Н., Зецер Ю.И. и др. Роль высыпающихся протонов в ионизации полярной ионосферы // *Космические исследования*. 2004. Т. 42, № 3. С. 219–227.
5. Fuller-Rowell T., Rees D., Quegan S., et al. A coupled thermosphere–ionosphere model. STEP Handbook on Ionospheric Models /ed. R.W. Schunk. 1996. Utah State University. P. 217–238.
6. Колесник А.Г., Голиков И.А., Чернышев В.И. Математические модели ионосферы. Томск: МГП «Раско», 1993. 238 с.
7. Ляхов А.Н., Зецер Ю.И., Фуллер-Роуэлл Т. Возможные последствия смещения магнитных полюсов для структуры и динамики верхней атмосферы Земли // *ДАН*. 2006. Т. 409, № 5. С. 688–690.

8. Danilov A.D., Mikhailov A.V. Spatial and seasonal variations of the foF2 long-term trends // *Ann. Geophys.* 1999. V. 17. P. 1239–1243.
9. Bremer J. Trends in the ionospheric E and F regions over Europe // *Ann. Geophys.* 1998. V. 16. P. 986–996.
10. Mikhailov A.V. Ionospheric long-term trends: can the geomagnetic control and the greenhouse hypotheses be reconciled // *Ann. Geophys.* 2006. V. 24. P. 2533–2541.
11. Emmert J.T., Picone J.M., Lean J.L., Knowles S.H. Global change in the thermosphere: Compelling evidence of a secular decrease in density // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109(A02301), doi:10.1029/2003JA010176.

Институт динамики геосфер РАН, Москва