

Национален Институт по Геофизика, Геодезия и
География
Българска Академия на Науките

АВТОРЕФЕРАТ

за получаване на научната степен „доктор на физическите науки“
професионално направление 4.4 Науки за Земята,
научна специалност: 01.04.08 “Физика на океана, атмосферата и околоземното
пространство”

на проф., д-р Наталия Андреева Килифарска

**Тема: МЕХАНИЗЪМ ЗА ВРЪЗКА МЕЖДУ
КОСМИЧЕСКИТЕ ЛЪЧИ, ГЕОМАГНИТНОТО ПОЛЕ
И КЛИМАТА НА ЗЕМЯТА**

София
2017

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТЕКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

I. Актуалност на изследването:

Натрупаните към момента палео-климатични данни предоставят неоспорими доказателства за съществуването на значителни отклонения от съвременните климатични условия, наблюдавани в отминали епохи от развитието на Земята (e.g. [Bakmutov, 2006](#); [Kobashi et al., 2011](#); [Brigham-Grette et al., 2013](#)). Причините за тези изменения са силно дискутирани в научната общност и все още нямат еднозначно обяснение. Наред с това, редица учени отбелязват, че измененията в климата често са съпътствани и от изменения в пространствената конфигурация на геомагнитното поле ([King, 1971](#); [Vieira and Silva, 2008](#); [Bakmutov et al., 2011](#); [Kilifarska et al., 2015](#)), откривайки взаимосвързаност в еволюцията им ([Elsasser et al., 1956](#); [Harrison and Funnell, 1964](#); [Bucha et al., 1970](#); [Wollin et al., 1971](#); [Courtillot et al., 1982](#); [2007](#); [Gallet et al., 2005](#); [Kilifarska et al., 2013](#)).

Едно от сериозните предизвикателства пред съвременната наука за климата е регионалността в проявленията на климатичните промени – както в съвременен, така и в палеоклиматичен аспект. Нещо повече, нито един от външните въздействащи фактори – с предполагаемо влияние върху климата във времевия диапазон десетилетия-столетия – не е в състояние да обясни регионалният характер на климатичните изменения. Поради тази причина той обикновено се свързва с активирането или затихването на устойчиви регионални климатични прояви, наричани *атмосферни моди*, причината за появата на които е също така неизяснена.

В този аспект, нехомогенното геомагнитно поле би могло да хвърли повече светлина върху регионалния характер на климатичните промени, ако се намери разумен физически механизъм за въздействието му върху климата. Изобщо, изясняването на факторите определящи дълго-периодичните вариации на климата е от особено значение за предвиждането на бъдещи промени в основните параметри на климата и поради това представлява основно предизвикателство пред съвременната наука за климата ([IPCC, 2013](#)).

II. Цели и задачи:

Основните цели на дисертационния труд включват:

- Изследване на пространствено-времените изменения в съвременния климат и геомагнитното поле на Земята, с оглед откриването на общи закономерности в тяхното развитие.
- Откриване на физически обоснован механизъм за осъществяването на геомагнитен контрол върху климатичните промени.
- Представяне на доказателства за валидността на предлагания механизъм на въздействие.

Постигането на поставените цели бе реализирано посредством изпълнението на следните задачи:

1. Установяване наличието на синхронност в еволюцията на геомагнитното поле и приземната температурата на въздуха за периода 1900-2010.
2. Изследване на пространствено-времените вариации на галактичните космически лъчи (ГКЛ) и геомагнитното поле.
3. Статистически анализ на свързаността между ГКЛ, озона и водната пара във високата тропосфера и ниската стратосфера (ВТНС).
4. Пространствено-времеви анализ на измененията на озона и водната пара във ВТНС, и вариациите на климата.
5. Оценка на ефективността на йонно-молекулярните реакции във ВТНС, инициирани от ГКЛ и влияещи върху концентрацията на озон и водна пара в близост до тропопаузата.
6. Изграждане на механизъм за влиянието на озона в ниската стратосфера върху климата.
7. Моделиране на причинно-следствената верига от връзки между геомагнитното поле, озона и водната пара в близост до тропопаузата и приземната температура с климатичния модел RegCM.

III. Новост на изследването:

- Установено е наличието на пространствени вариации в свързаността между геомагнитното поле и дълго-периодичните колебания в интензитета на ГКЛ – с добре обособени области на особено силен геомагнитен контрол;
- Представено е теоретично обяснение за „фокусирането“ на ГКЛ в определени райони от земната повърхност (изразено в повишена ефективност на въздействие върху ниската стратосфера);
- Изследвана е ефективността на йонно-молекулярните реакции, активирани от ГКЛ в близост до тропопаузата и е открит нов източник за образуването на озон на тези нива;
- Установено е съществуването на пространствено-времева свързаност между измененията в плътността на озона, водната пара и приземната температура през изследвания период (1900-2010);
- Предложен е нов механизъм обясняващ влиянието на озона (в близост до тропопаузата) върху приземната температура и респективно върху климата на Земята;
- Изведена и моделирана е причинно-следствена верига от връзки свързваща геомагнитното поле с климата.

IV. Практическо значение:

На пръв поглед новостите в това изследване имат предимно евристично значение, разкривайки и предлагайки обяснение на неизвестни до сега връзки между геомагнитното поле, интензитета на ГКЛ и някои от параметрите на климата. Обаче, откриването на причината пораждаща регионалните особености в изменението на климата, има непосредствено практическо приложение в прогностичните модели на климата.

Последните изследвания показват, че съвременните („state of the art”) климатични модели определено завишават температурата и влажността във високата тропосфера, която има най-съществен принос (~ 67%) в парниковия ефект. Това определено води до прогнозирането на нереалистично висок тренд в ръста на приземната температура ([Pierce et al., 2006](#); [Risi et al., 2012](#)).

В този смисъл, по-адекватното прогнозиране на бъдещите климатични изменения има огромно значение за дългосрочното планиране на енергийните и водни ресурси, за селското и горските стопанства (с оглед на промените в растителния и животински свят), за инвестиционни фондове и застрахователни компании, миграционни процеси и пр.

V. Реализация на поставените цели:

По етапното постигане на целите на дисертацията започна с масиран статистически анализ на огромни масиви от данни за магнитното поле, ГКЛ, приземната температура, озона и водната пара. Бяха използвани разнообразни статистически подходи – линейни и нелинейни, с цел разкриването на причинно-следствените връзки между разглежданите променливи. Това доведе до откритието на „фокусируйката“ на ГКЛ в определени райони от земната повърхност. Оказа си, че тези райони доста точно съвпадат с нееднородното разпределение както на свързаността на ГКЛ с атмосферните параметри, така и на връзките помежду им. Тези резултати наложиха търсенето на обяснение за нехомогенното въздействие на геомагнитното поле върху ГКЛ.

Обяснението на този ефект, не описан до сега в литературата, наложи преосмислянето на представите за геомагнитното поле като поле на магнитен дипол. Беше показано, че нееднородностите в геомагнитното поле (т.е. отклоненията му от полето на магнитен дипол) са основна причина за увеличаването на потока високо-енергетични частици в едни региони и намаляването ѝ в други.

С навлизането в спътниковата ера става ясно, че озона в ниската стратосфера – независимо от дългия му жизнен цикъл – е също толкова нееднородно разпределен в пространството ([Hood and Zaff, 1995](#); [Stebloba, 1978](#); [2001](#); [Peters et al., 2008](#)). Този факт провокира търсенето на връзки между пространствено-времените вариации на ГКЛ и озона. Статистически такава връзка бе намерена в различни бази от данни, за различни периоди от време. Физическото обяснение на тази свързаност дойде с оценката на ефективността на йонно-молекулярните реакции – активирани от вторичните електрони в максимума на Регенерер-Пфотсер, в близост до тропопаузата. (Последните са резултат от каскадното взаимодействие на ГКЛ с атмосферата – [e.g. Usoskin et al., 2004](#); [Velinov et al., 2013](#); [Mishev and Velinov, 2015](#)).

Откритието на автокаталитичен цикъл за образуването на озон в ниската стратосфера, е новост в досегашните схващания, че единствената възможност за образуване на озон в земната атмосфера е фотохимичната дисоциация на молекулярния кислород O_2 от слънчевата UV радиация. Всичките тези резултати оформиха идеята за съществуването на причинно-следствени връзки между геомагнитното поле, ГКЛ и озона във ВТНС.

Следващият етап от изследването бе да се установи механизма за предаване на вариациите в плътността на ниско-стратосферния озон – надолу до земната повърхност. Въз основа на статистически установената свързаност между озона и водната пара във ВТНС, бе предложен механизъм според който измененията в концентрацията на озона влияят върху температурата на тропопаузата, която от своя страна определя устойчивостта на въздушните маси във високата тропосфера. Така например, охлаждането на тропопаузата повишава неустойчивостта на въздушните маси във високата тропосфера. Това, от своя страна, благоприятства възходящите движения и износа на водна пара от по-ниско лежащите слоеве на тропосферата в бедния на водни пари слой около тропопаузата. И тъй като моделните експерименти и спътниковите измервания показват, че водната пара във ВТНС има най-голям принос в парниковия ефект ($\sim 90\%$ от ефекта на целия воден стълб в атмосферата; [Inamdar et al., 2004](#)), то вариациите в плътността на озона в близост до тропопаузата биха могли да влияят непосредствено върху приземната температура.

Предложеният механизъм за влиянието на озона върху климата бе проверен с помощта на регионалния климатичен модел RegCM.

VI. Приноси:

1. Изследвана е пространствената нехомогенност на геомагнитното влияние върху интензитета на ГКЛ в ниската атмосфера;
2. Теоретично е аргументирана геомагнитната «фокусировка» на високо-енергетичните частици в определени региони от земната повърхност;
3. Установени са пространствено-времевите измерения на *свързаността* на ГКЛ с озона и водната пара в близост до тропопаузата, с приземната температура, както и на взаимозависимостите помежду им;

4. Открит е нов източник на озон в максимума на Пфотзер (т.е. в близост до тропопаузата) и е създаден химичен модел за продукцията на O_3 ;
5. Предложен е механизъм за влиянието на ниско-стратосферния озон върху приземната температура и респективно върху климата на Земята;
6. Веригата от причинно-следствени връзки между геомагнитното поле и климата е вградена в регионалния климатичен модел RegCM, като направените числени експерименти потвърждават валидността на предлагания механизъм.

VII. Аprobация на изследването:

А. Публикации по темата на дисертацията

Общият брой на статиите отразяващи различни аспекти от дисертационния труд е 33, от които 25 статии в научни списания и 8 – публикации в сборници от конференции. Списък на публикациите е даден в Приложение 1. Подробна класификация на статиите според ранга на списанието и авторския колектив е дадена в Таблица 1.

Таблица 1.

	Списания с ИФ	Реферирани сп. без ИФ	Сборници	Общ брой
Самостоятелни	7	6	3	16
Първи автор	3	5	4	12
Втори или следващ автор	3	1	1	5

След получаването на званието „професор“ през март 2013 са публикувани общо 16 статии, от които 13 в научни списания и 3 в сборници от конференции.

В. Доклади на научни конференции

Резултати от дисертацията са представяни по-етапно на 31 конференции като 16 от тях са след придобиването на научното звание „професор“.

С. Обем на дисертацията

Дисертационният труд съдържа 140 страници, организирани в 7 глави, от които първата представлява въведение в проблема, а последната – синтезира основните резултати и направените изводи.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. **Глава първа** е въведение в разглежданата проблематика, представяща необходимостта от съвместното изучаване на пространствено-времените вариации наблюдавани в геомагнитното поле и климата. Тук са дефинирани основните проблеми, целите и задачите за изпълнение поставени в дисертационния труд.

2. **Глава втора** представлява обзор на съществуващите към момента представи за основните климатообразуващи фактори. Направен е преглед на известните механизми на влияние на *външните* за климатичната система (Слънце, галактични космически лъчи, гравитационни смущения от големите планети в слънчевата система и литосферна активност), както и на *вътрешните фактори* с предполагаемо влияние върху изменчивостта на климата на Земята (океаните, състава на атмосферата, атмосферните моди и въздействието на живите организми). Показано е, че много от особеностите в измененията на климатичната система, в частност регионалния характер на наблюдаваните промени, са необясними в рамките на съществуващите до сега хипотези. Този факт налага провеждането на допълнителни изследвания с цел откриването на нови механизми на влияние върху състоянието на климата.

3. **Глава трета** представя факти за съвместното изменение на геомагнитното поле и климата забелязани от други автори както и собствени резултати. Изложението започва с методологична част, в която автора изяснява огромната роля на избраните методи на изследване за коректността на получените резултати. Дадени са примери, как неправилния избор на статистически техники за изследване водят до неправилни изводи и в крайна сметка да неразбиране на процесите влияещи върху изменчивостта на изследваната променлива.

Във втория параграф на тази глава автора представя резултати подкрепящи идеята за наличие на връзки между пространственото

разпределение на геомагнитното поле и аномалиите в някои климатични параметри, както и за синхронизация на измененията им във времето. Примери за подобие в пространственото разпределение на геомагнитното поле и приземната температура на въздуха – в Северното и Южното полукълбо – са представени на Фиг. 3.5 и 3.6.

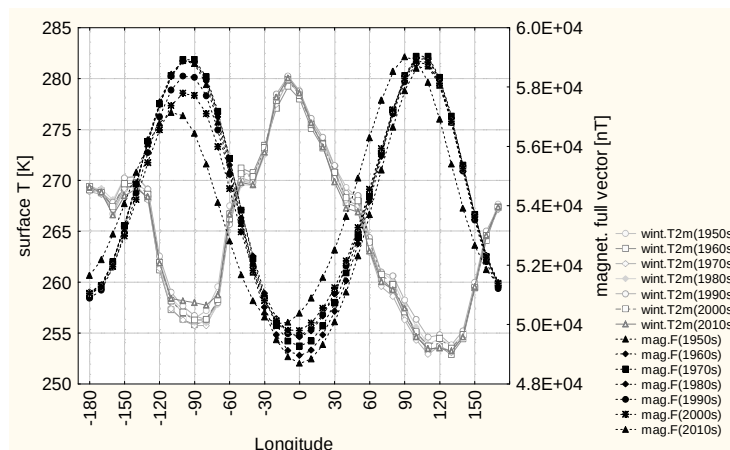


Fig. 3.5 Decadal variations of the **Northern Hemisphere** winter air surface temperature (grey symbols) and geomagnetic field intensity F (black symbols), latitudinally averaged (over the $40\text{--}70^\circ\text{N}$ latitudes), given for seven consecutive decades. The decadal values of surface temperature for the first and last decades are derived from less than 10 years. Data sources: International Geomagnetic Reference Field model (<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/geomag.shtml>) and merged reanalyses ERA 40 and ERA Interim.

Пример за синхронизация на измененията във времето е показан на Фиг. 3.7, илюстрираща пространственото разпределение на корелационните коефициенти между вековите вариации на геомагнитното поле и приземната температура. Късо-периодичните флуктуации в температурата са филтрирани с 11 точково изглаждане. Картите са построени върху статистически значимите корелационни коефициенти (с ниво на достоверност 2σ , т.е. 95%), изчислени във всяка точка на мрежа с гъстота 10^0 по ширина и дължина.

Корелационните карти са сравнени с 111 годишни средни на динамичните температурни аномалии (дефинирани като отклонения от динамично изменящите се 10 годишни средни стойности). Лесно се вижда, че в Северното полукълбо отрицателните температурни аномалии съответстват на отрицателните корелационни коефициенти между геомагнитното поле и температурата и обратно – положителните корелационни коефициенти маркират областите с положителни температурни аномалии.

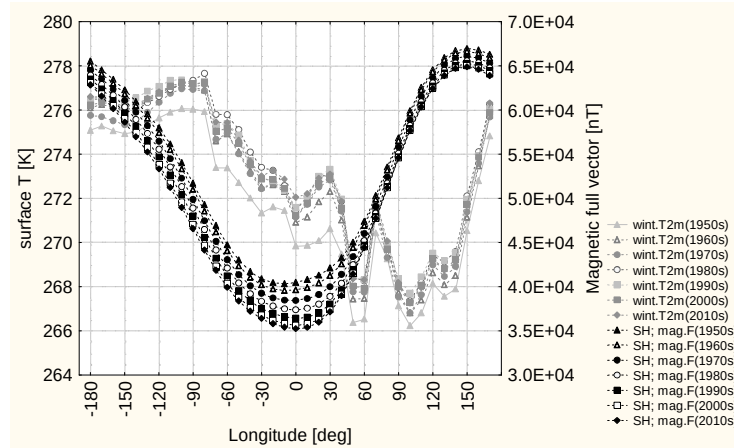


Fig. 3.6 Decadal variations of the **Southern Hemisphere** winter air surface temperature (grey symbols) and geomagnetic field intensity F (black symbols), latitudinally averaged (over the $40\text{--}70^\circ\text{S}$ latitudes), given for seven consecutive decades. The decadal values of surface temperature for the first and last decades are derived from less than 10 years. Data sources: International Geomagnetic Reference Field model (<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/geomag.shtml>) and merged reanalyses ERA 40 and ERA Interim.

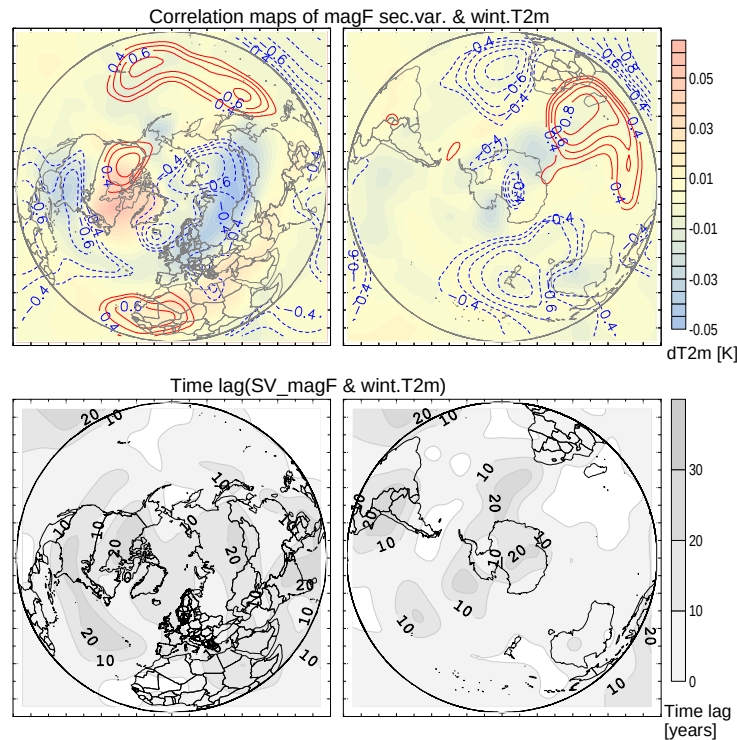


Fig. 3.7 (top) Correlation maps of geomagnetic secular variations and surface temperature – T (dashed and continuous contours), overdrawn on the surface T dynamical anomalies (i.e. deviations from dynamically varying mean) averaged over 111 years; Northern Hemisphere – left, Southern Hemisphere – right panel; (bottom) Time delay between surface T and geomagnetic variations. Data sources: International Geomagnetic Reference Field model (<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/geomag.shtml>) and merged reanalyses ERA 40 and ERA Interim.

Фиг. 3.7 показва още, че за разлика от Северното, в Южното полукълбо съответствието между зоните с повишена корелация между геомагнитното поле и климата, и знака на динамичните температурни аномалии е нарушено. Сам по себе си този факт буди много въпроси и заслужава по-детайлно изучаване.

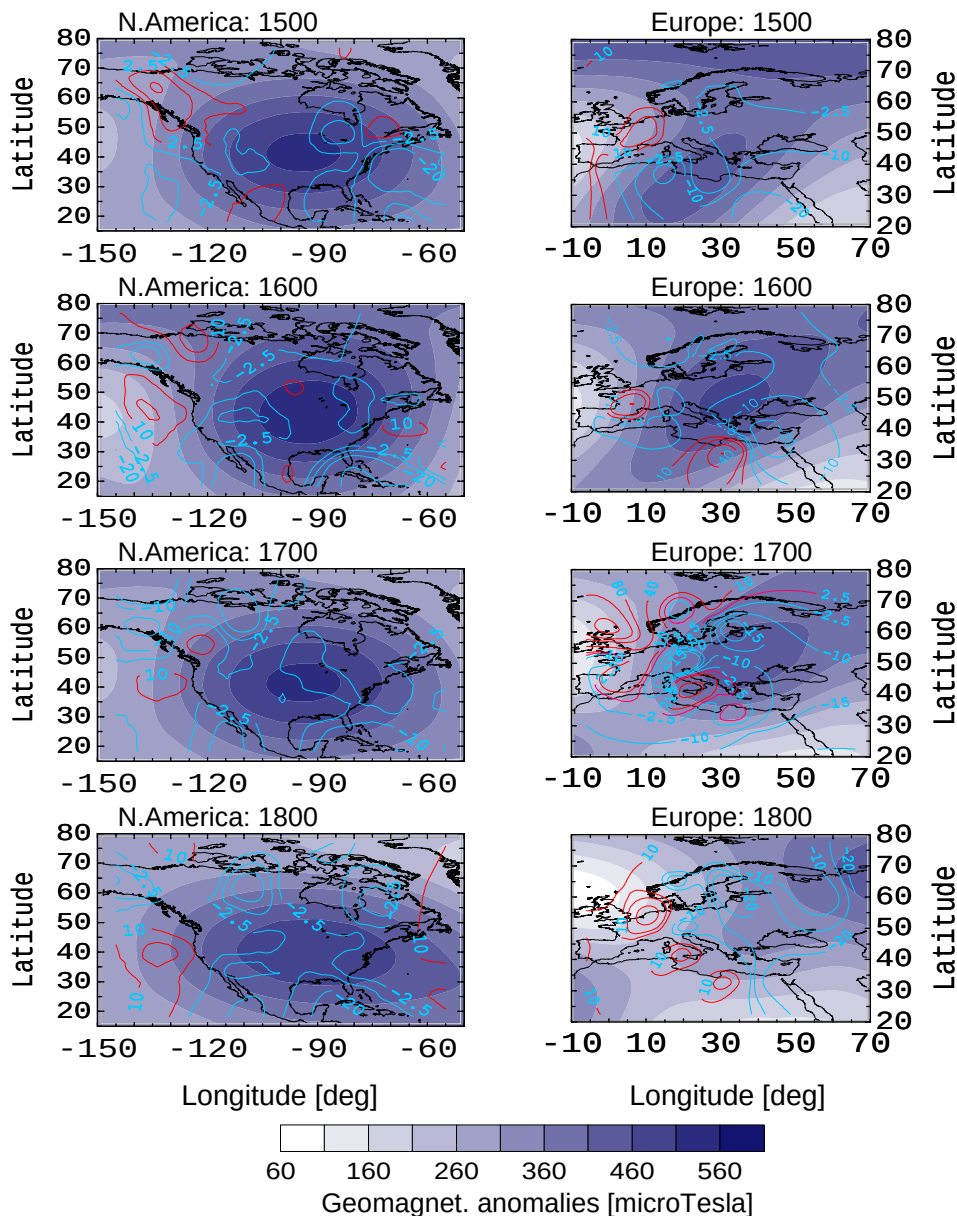


Fig. 3.10 Centennial snapshots of geomagnetic field anomalies in μT over N. America and Europe during the period 1400-1800 (coloured shading). Overdrawn are contours of percentage deviation of tree growth from the temporal mean stand's growth; positive values indicate faster, while negative ones – slower tree growth.

По данни от европейския ре-анализ ERA 20 century, в дисертацията е показано и наличието на 22- и 60-годишна изменчивост в приземната температура и озона на 70 hPa, които предполагат връзки със съответните квази-периодични изменения в слънчевото динамо (22-годишния цикъл на Хейл) и вековите вариации на геомагнитното поле.

Фиг. 3.10 сравнява вековите вариации в приземната температура (определени по скоростта на нарастване на годишните кръгове на дърветата - дендрохронология) и отклоненията на геомагнитното поле от полето на магнитен дипол по модела CALS7K ([Korte and Constable, 2005](#)) за периода 1400-1800 г.. Фигурата илюстрира много добре (забелязаната и от други автори) тенденция, че усиляването на интензитета на геомагнитното поле е съпроводено с понижение на приземната температура на средни и високи ширини.

4. Глава четвърта е посветена на влиянието на геомагнитното поле върху високо-енергетичните частици бомбардиращи постоянно или спорадично земната атмосфера. След кратка въвеждаща информация за произхода, състава и изменчивостта на галактичните космични лъчи и слънчевите протони, са разгледани теоретичните основи на движението им в нехомогенно магнитно поле. Представени са законите на взаимодействие на високо-енергетичните частици с атомите и молекулите в атмосферата, водещи до каскадни реакции на йонизация и създаване на свободни електрони и йони в атмосферата, както и механизмите за образуването на космогенни изотопи като ^{10}Be и ^{14}C .

Показано е, че колкото по-дълбоко проникват частиците, толкова по-силно те усещат нееднородностите в геомагнитното поле (т.е. отклонението му от полето на магнитен дипол). Базирайки се на теоретичен анализ, автора предполага, че районите със силен хоризонтален градиент на геомагнитното поле ще „фокусират“ по-голям брой частици от тези с по-хомогенна структура на геомагнитното поле. В резултат трябва да се очаква по-голяма интензивност на частиците достигащи ниските слоеве на атмосферата в районите със силно нехомогенно магнитно поле.

Корелационния анализ на свързаността между интензитета на геомагнитното поле и галактичните космични лъчи (ГКЛ) потвърждава този извод (Фиг. 4.4).

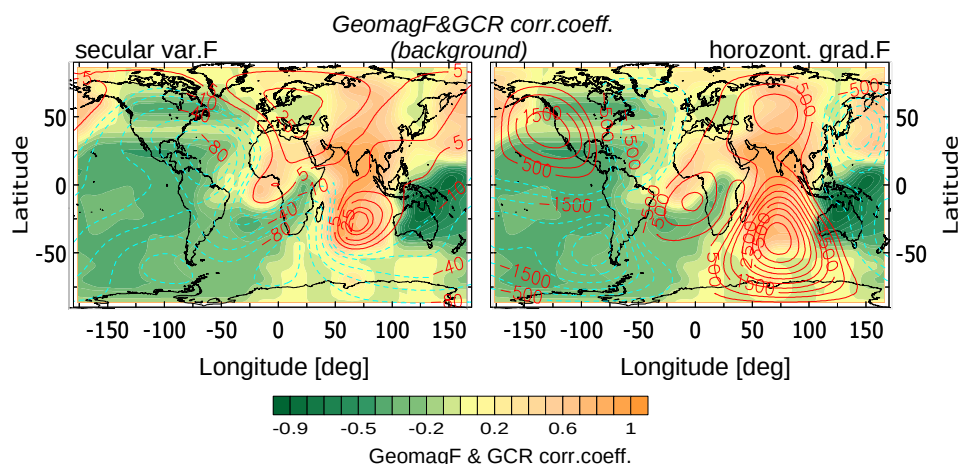


Fig. 4.4 Instantaneous correlation maps (coloured shading) of geomagnetic field intensity with galactic cosmic rays; Overdrawn are contours of secular variations (left) and the longitudinal gradient of geomagnetic field (right); continuous (red) contours denote positive values, dashed (blue) contours – negative one. Data sources: IGRF model (<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/geomag.shtml>) and Usoskin et al., 2002 – data for GCR.

Сравнението с вековите вариации на геомагнитното поле (левия панел на Фиг. 4.4) показва, че геомагнитното поле и ГКЛ се изменят синхронно в районите с усилящо се магнитно поле (т.е. червените линии, показващи положителна тенденция във вековите вариации) и асинхронно – в районите с отслабващо магнитно поле (сините пунктирани линии).

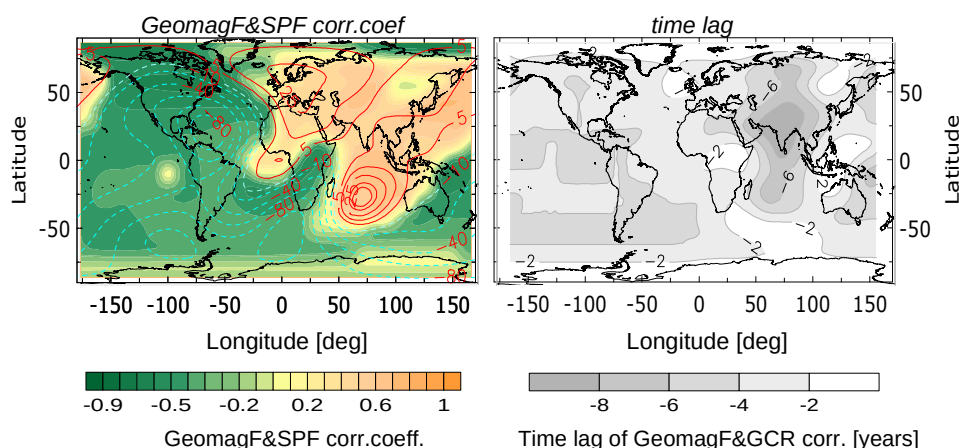


Fig. 4.5 Lagged correlation map (coloured shading) of geomagnetic field intensity with solar proton flux ($E > 10 \text{ MeV}$), calculated over the period 1970-2013; overdrawn are contours of geomagnetic field secular variation, where continuous contours denote positive values, dotted contours – negative one. Time lag in years is shown in the right panel. Data sources: geomagnetic field is calculated by the use of IGRF model (<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/geomag.shtml>). The record of solar proton fluxes is compiled from (i) historical reconstruction of solar cosmic ray events by McCracken et al., 2001, (ii) data for solar proton fluencies for the period 1955-1986 (Shea and Smart, 1990), and (iii) NOAA satellite data since 1976.

Сравнението с хоризонталния градиент на магнитното поле (десен панел на Фиг. 4.4) доуточнява, че свързаността между геомагнитното поле и ГКЛ е най-силна в районите с най-силна нехомогенност на магнитното поле.

Аналогичното изследване на чувствителността на слънчевите протони към нееднородностите на геомагнитното поле показва, че те са най-чувствителни към вековите вариации на полето (Фиг. 4.5).

5. **Пета глава** е посветена на въздействието на свободните електрони в максимума на Регенерер-Пфотсер върху баланса на озона и водната пара около тропопаузата. Посредством детайлен анализ на ефективността на възможните йонно-молекулярни реакции, индуцирани от ниско-енергетични електрони в максимума на Регенерер-Пфотсер е показано, че над тропопаузата – където количеството на H_2O пара е изключително малко – съществуват условия за активирането на автокаталитичен цикъл за формиране на озон. Това е нов механизъм, който е в състояние да обясни не само изменчивостта във времето, но и регионалните особености в пространственото разпределение на озона в ниската стратосфера, включително – дължинните вариации и асиметрията между Северното и Южното полукълбо.

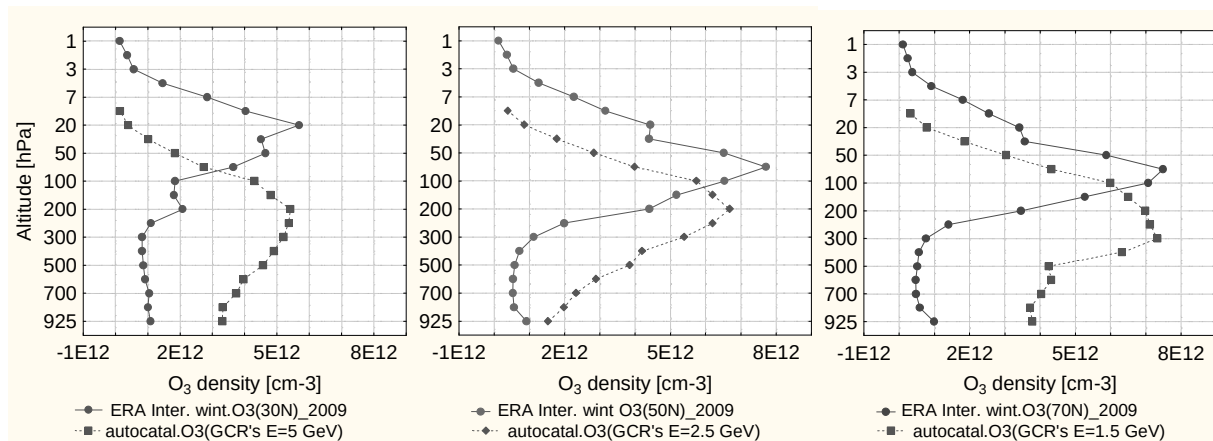


Fig.5.1 Autocatalytic ozone profiles produced by GCR with energies 5 GeV (left), 2.5 GeV (middle) and 1.5 GeV (right), compared with ERA Interim O_3 profile for January 2009, derived at $30^\circ N$ latitude (left), $50^\circ N$ latitude (middle) and $70^\circ N$ latitude (right), at Greenwich meridian.

Вертикални профили на озона произведен от автокаталитичния цикъл са сравнени с озонните профили на реанализа ERA Interim за януари 2009 г. и резултатите са представени на Фиг. 5.1.

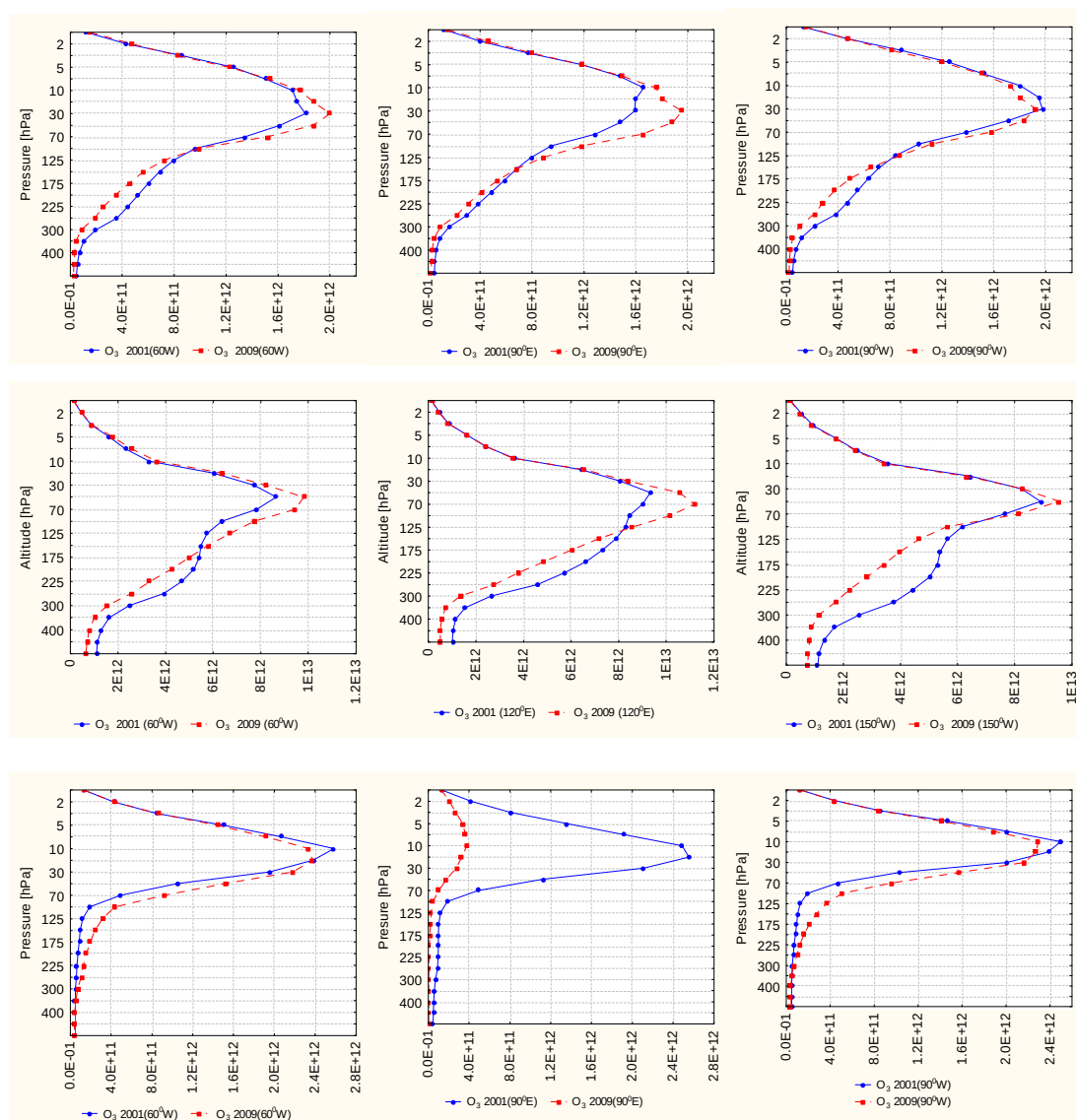


Fig. 5.2 Vertical profiles of winter O_3 density for high (blue continuous line) and low (dashed red line) solar activity at three longitudes of: $70^\circ N$ (top), $50^\circ N$ (middle) and $30^\circ N$ (bottom) latitudes. Data source: ERA Interim.

Реалистична оценка за вариациите на озона в зависимост от слънчевата активност (и респективно интензитета на ГКЛ) е получена посредством сравняването на височинните профили на озона (по данни от реанализа ERA Interim), съответно за 2001 г. – година на слънчев максимум, и 2009 г. – година на слънчев минимум. Резултатите са показани на Фиг. 5.2. Вижда се, че на полярни и средни ширини максималната концентрация на O_3 в годината на слънчев минимум надвишава съответната концентрация в периода на слънчев максимум, почти на всички дължини. Това поведение на озона е

необяснимо без привличането на ГКЛ като допълнителен източник на озон в ниската стратосфера. На субтропични ширини, където озоновия максимум е разположен на по-голяма височина, а максимума на вторичните електрони – на по-малка, такова превишение в концентрацията на O_3 в периода на слънчев мин. се наблюдава единствено под максимума на озоновия слой (Фиг. 5.2, долен панел).

Освен това е сравнено пространственото разпределение на автокаталитично произведения озон и озона на 70 hPa по данни от ERA Interim (Фиг. 5.3). Доброто съответствие между тях показва, че новооткрития механизъм за производство на озон може да има съществено влияние върху баланса на озона в ниската стратосфера.

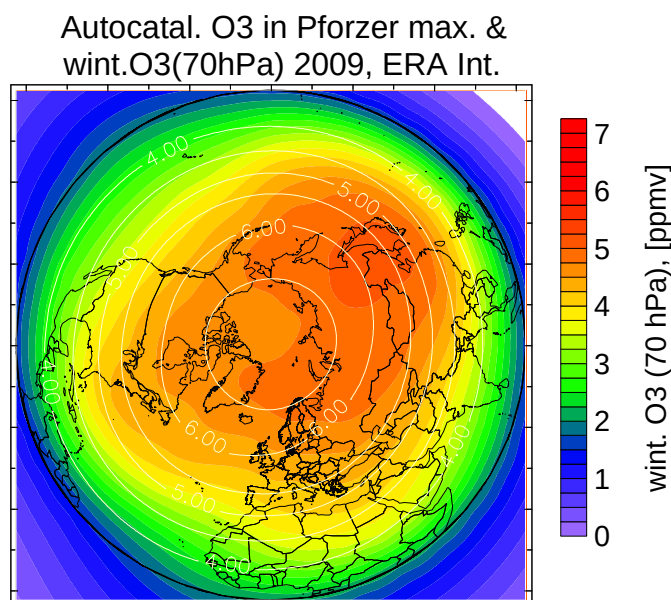


Fig.5.3 Autocatalytically produced ozone [ppmv] in the lowermost stratosphere (contours), in the latitudinal band 30° - 90° N, compared with the winter O_3 mixing ratio at 70 hPa, derived from ERA Interim reanalysis, for 2009 year (coloured shading).

Ако, обаче максимума на Регенерер-Пфотсер е разположен под нивото на тропопаузата, където количеството на водната пара е значително по-високо, вместо озон се образуват водни клъстери от типа $O_3^-(H_2O)_n$, а също така йонно-молекулярни реакции водещи до разрушаването на озона (Kilifarska 2013, 2017).

Акцента в третия параграф е поставен върху влиянието на слънчевите протони върху баланса на атмосферния озон. Направен е кратък преглед на известните HO_x и NO_x озono-разрушаващи цикли в мезосферата и високата

стратосфера. Теоретично е моделирана една малко известна способност на озона да се възстановява на по-ниски нива в атмосферата, когато във височина количеството му е силно редуцирано. Направени са числени експерименти, които показват, че колкото по-дълбоко е проникнала редукцията на озона, толкова по-силно е самовъзстановяването му на по-ниски нива (Фиг. 5.4). Това показва, че слънчевите протони, енергията на които не достига да проникнат до ниската стратосфера и да повлияят непосредствено върху концентрацията на озона там, все пак могат да оказват индиректно влияние върху плътността му около и под максимума на слоя (Фиг. 5.4).

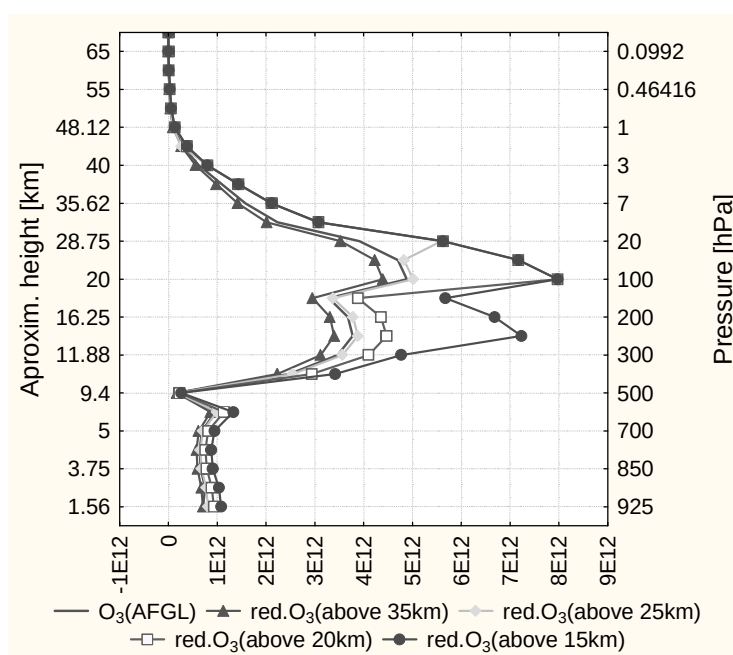


Fig. 5.4 Altitude dependence of the self-restoration effect on the reduction of its optical depth above 35, 25, 20 and 15 km respectively. Note that deeper penetration of negative O_3 anomaly increases the amplitude of self-healing effect (from [Kilifarska et al., 2013](#)).

Четвъртия параграф се фокусира върху обяснението на наблюдаваните асиметрии в пространственото разпределение на озона ([Steblova 1978; 2001; Hood and Zaff 1995; Peters et al., 2008](#)). Представен е статистически анализ на връзките между ГКЛ, тоталното съдържание на озон (т.е., съдържанието в целия стълб на атмосферата) и относителната плътност на озона на ниво 70 hPa. Показано е, че пространственото разпределение на свързаността между тях се изменя не само по сила, но и по знак (Фиг. 5.6 и 5.9).

Сравнението между Фиг. 5.6 и 5.9 показва, че в полярните области както тоталното съдържание на озон (ТСО) така и количеството му в ниската

стратосфера намалява прогресивно почти през целия 20-ти век (виж и Фиг. 5.8). Съвсем различно е, обаче, поведението на ТОС и озона в ниската стратосфера в тропичните региони (сравни Фиг. 5.6 и 5.9).

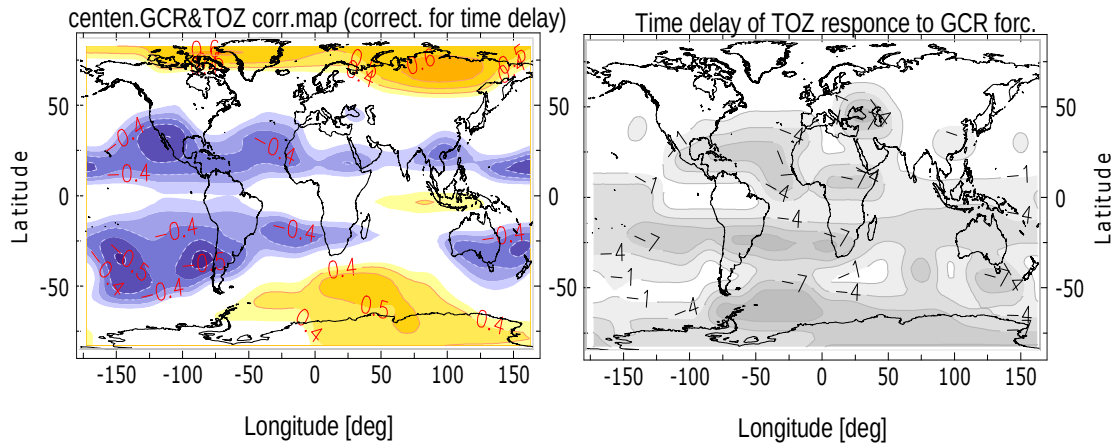


Fig. 5.6 (left) Correlation maps of **GCR** and **winter** total ozone density (TOZ), corrected for time lags; (right) Time delay of TOZ response to GCR forcing in years. Data sources: GCR are from Usoskin et al., 2002; total O_3 density is taken from ERA 20 century reanalysis.

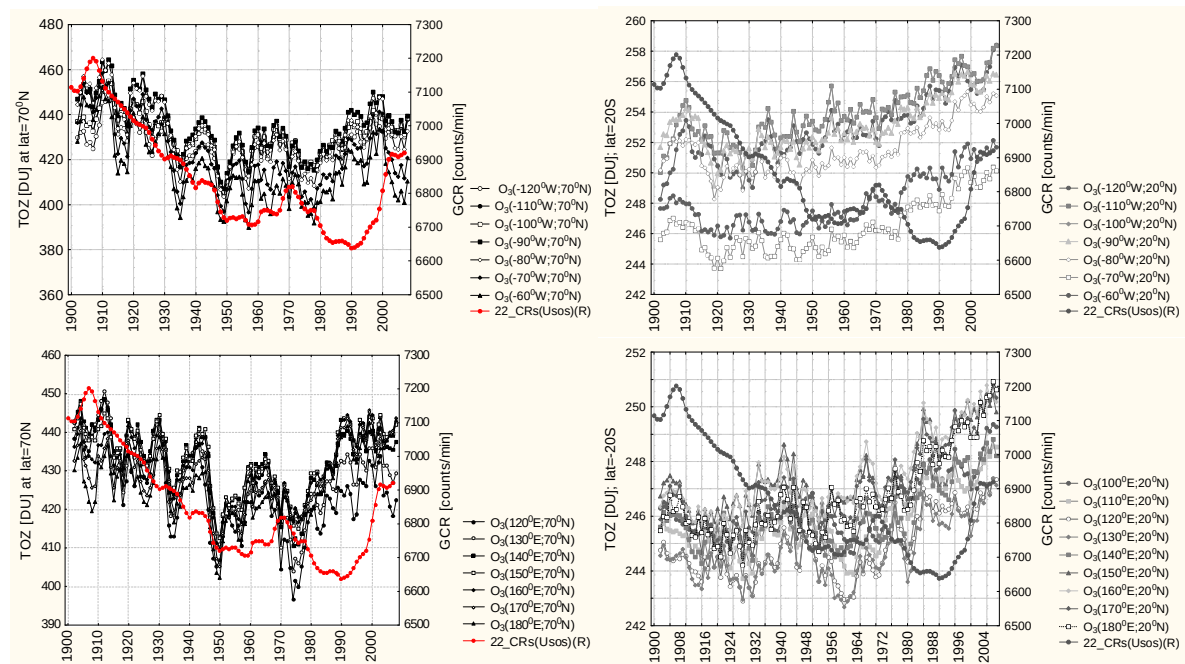


Fig. 5.8 Time series of total ozone density in the Northern Hemisphere, lat.= 70°N (left panels) and Southern Hemisphere, lat.= 20°S (right panel). Note the different tendencies in TOZ centennial evolution at high and low latitudes. Data source: ERA 20 century for specific humidity and Usoskin et al., 2002 – for GCR.

Докато ТОС в тропиците расте през цялото столетие (Фиг. 5.8), озона в ниската стратосфера следва отрицателния тренд на ГКЛ. Това показва, че последния си има свои собствени закони на развитие, което е индиректно потвърждение на идеята за съществуването на допълнителен източник на озон в ниската стратосфера.

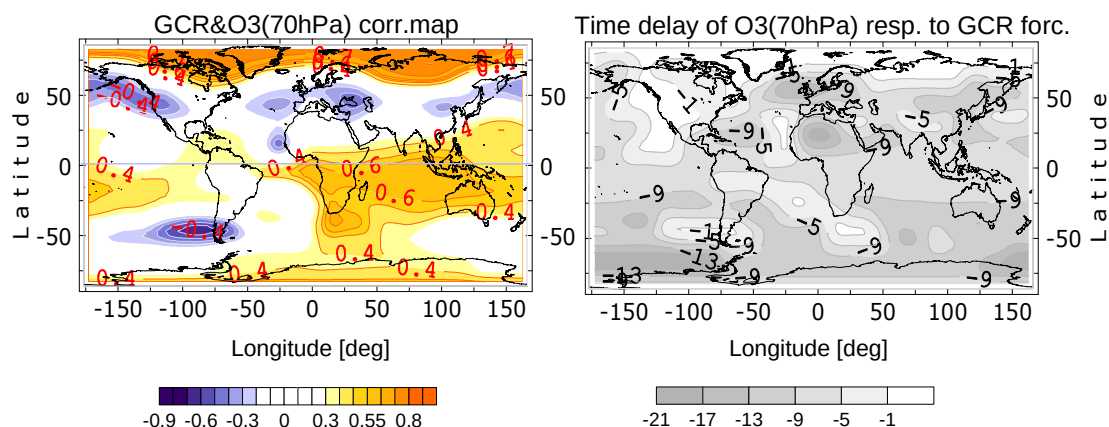


Fig. 5.9 (left) Correlation coefficients of *galactic cosmic rays* with winter's ozone volume mixing ratio at 70hPa – statistically significant at 95% and corrected for time lag; (right) Time delay of O_3 response to GCR forcing in years. Data sources: GCR are from Usoskin et al., 2002; O_3 ratio at 70 hPa is taken from ERA 20 century reanalysis.

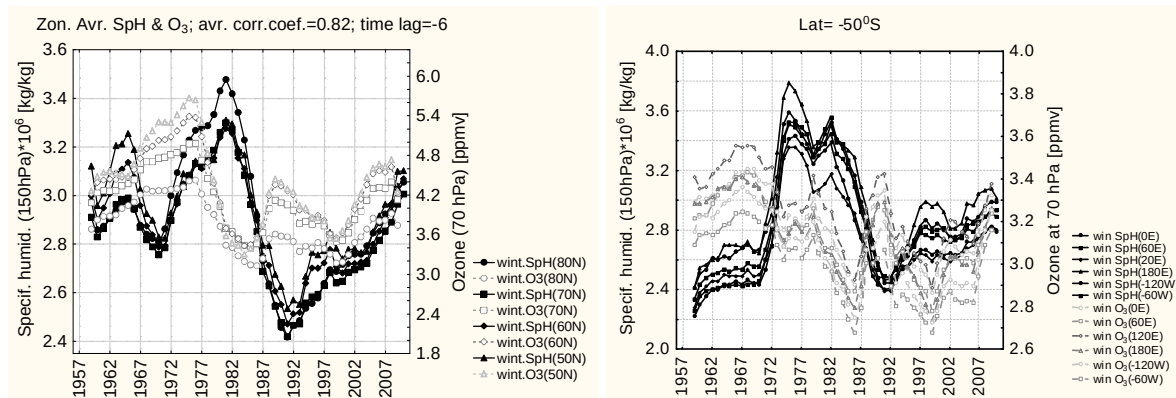


Fig. 5.17 (left) Time series of zonally averaged winter O_3 mixing ratio at 70 hPa and specific humidity at 150 hPa at 80° , 70° , 60° and 50° latitudes (smoothed by 5 point running average). Note their synchronous variability, with vapour response to O_3 changes delayed by ~ 6 years. (right) Southern Hemisphere O_3 (70 hPa) and H_2O vapour (150 hPa) time series at $50^\circ S$ latitude and different longitudes. Data source: merged ERA-40 and ERA Interim reanalyses.

В пети параграф е разгледано влиянието на ГКЛ върху водната пара на 150 hPa. Високите корелационни коефициенти между тях логично пораждат въпроса за движещия фактор във взаимозависимостта между озона и водната

пара във ВТНС ([Pan, 1997](#)). Отговорът на този въпрос определя и фокуса на шестия параграф в глава 5.

Илюстрация на синхронизираните във времето изменения на озона и водната пара е дадена на Фиг. 5.17. Тази синхронизация предизвиква въпроса кой е водещия фактор във взаимовръзката между озона и водната пара.

Разностранния анализ на зависимостта от ГКЛ както и на взаимодействието между озона и водната пара във ВТНС показва, че пространствено-времевата свързаност между тях не е обусловена от едновременното влияние на ГКЛ върху всеки от тях. По-скоро тя се дължи на непрекъснатото взаимодействие между озона и водната пара. Причината за това се крие във различните ефекти, които ГКЛ оказват върху състава на атмосферата около тропопаузата, например като създават или да унищожават озон (в зависимост от дълбочината на проникване в атмосферата). Анализите показват, че през зимата, на средни ширини водещ фактор е озона. В тропичните области, както и в полярните райони на Южното полукълбо, обаче, използваните методи не позволиха определянето на водещия фактор.

6. Глава шеста представя нов механизъм посредством който геомагнитното поле е в състояние да влияе върху климата. След кратко описание на съществуващите до момента хипотези, започва по-етапното въвеждане и изясняване ролята на всеки един от елементите в причинно-следствената верига от процеси, свързващи геомагнитното поле и климата (виж графичната схема).

Тъй като първите две звена от веригата са обект на представяне и изследване в четвърта и пета глава, в глава 6 се разглежда в детайли влиянието на озона върху температурата и водната пара във високата тропосфера и ниската стратосфера (ВТНС), както и влиянието им върху приземната температура.

Учените са забелязали отдавна, че измененията в концентрацията на стратосферния озон водят до изменения в приземната температура ([Manabe and Strickler, 1964](#); [Manabe and Wetherald, 1967](#); [Ramanatan et al., 1976](#); [Forster and Shine, 1997](#); [Stuber et al., 2001, etc.](#)).

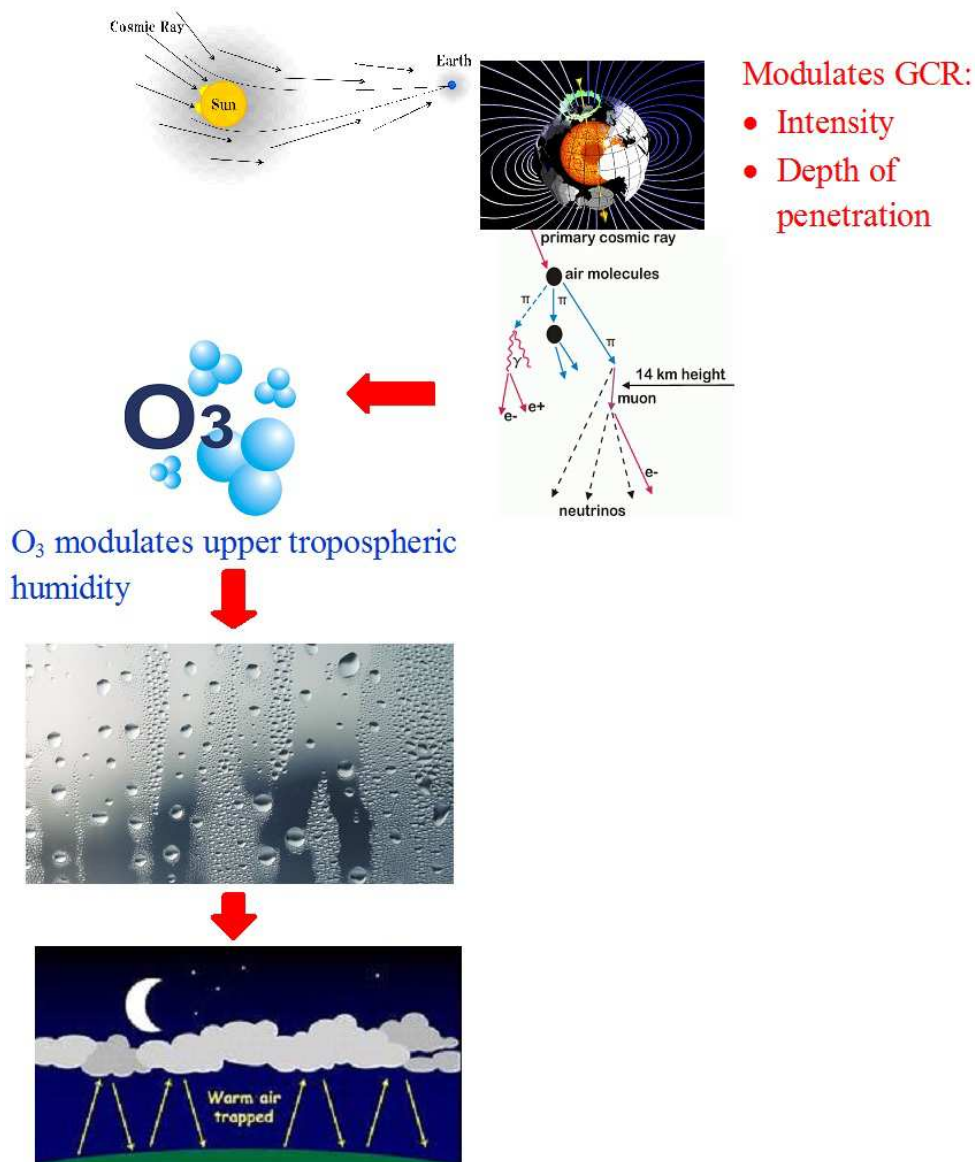


Схема на веригата от причинно-следствени връзки обясняващи влиянието на геомагнитното поле и ГКЛ върху климата.

Много автори смятат, че чувствителността на приземната температура към вариациите на озона се дължи на влиянието му върху радиационния баланс на планетата. Ако това е основната причина, то тогава остава необяснимо защо най-голямо влияние имат не измененията в максимума на озоновия слой, а тези в близост до тропопаузата, където количеството на озона е силно редуцирано. Освен това, лъвския пай в радиационния баланс на планетата принадлежи на водната пара във високата тропосфера (Spencer and Braswell, 1997; Inamdar et al., 2004), което предполага, че измененията в

концентрацията на озона са само тригер, но не и основен причинител на измененията в температурата при земята.

От друга страна, многобройни изследвания показват, че независимо от малката концентрация на озона в ниската стратосфера, измененията му с времето силно корелират с температурата на *тропопаузата* (Wirth, 1993; de Forster and Tourpali, 2001; Seidel and Randel, 2006; Gauss et al., 2006; Randel et al., 2007). Тази синхронност в измененията на озона и температурата на тропопаузата се дължи на силното поглъщане на слънчевия ултравиолет от озона, което определя и възможността му да влияе върху температурата на тропопаузата.

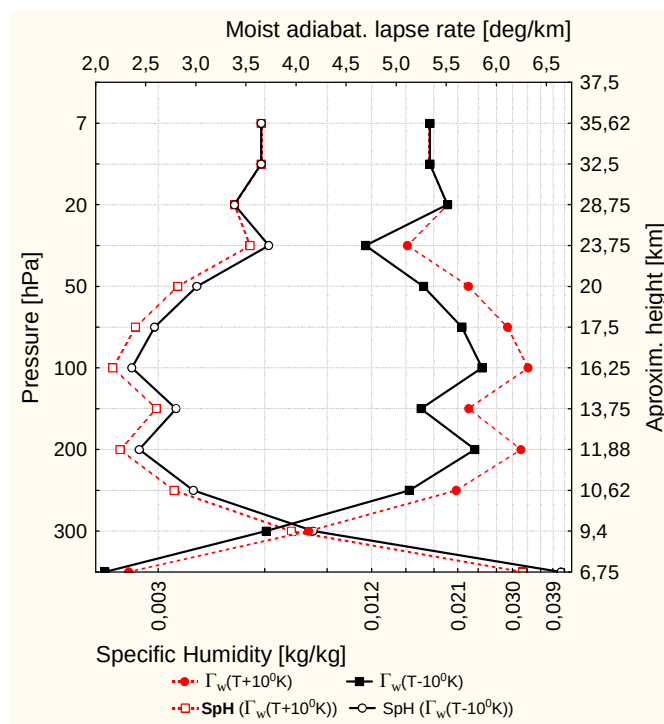


Fig. 6.2 Moist adiabatic lapse rate (Γ_w) profiles calculated for reduced (continuous line with full squares) or increased (dotted line with full dots) by 10^0K temperature profile from Terra Nova Bay (Tomasi et al., 2004). Given are also specific humidity (SpH) calculated with decreased temperature (continuous line with open squares), or increased temperature (dotted line with open squares) and corresponding for these temperatures Γ_w .

С помощта на числени експерименти, в параграф 6.2.2 е показано, че охлаждането на тропопаузата води до понижение на влажно-адиабатния температурен градиент във високата тропосфера. В резултат неустойчивостта на въздушните маси на тези нива се увеличава (Young, 2003; North and Eruhimova, 2009), което благоприятства износа на влага от по-ниските слоеве

на тропосферата във височина. И тъй като водната пара във високата атмосфера определя ~90% от парниковия ефект на цялото количество водната пара в атмосферата (Inamdar et al., 2004), то овлажняването на високата тропосфера усилва парниковия ефект. Обратно, затоплянето на тропопаузата, в периоди с повишена озонна плътност, увеличава влажноадиабатния температурен градиент (Фиг. 6.2), което от своя страна стабилизира въздушните маси във високата тропосфера и съответно затруднява износа на водна пара във височина. Изсушаването на високата тропосфера води съответно до отслабване на парниковия ефект и понижение на приземната температура.

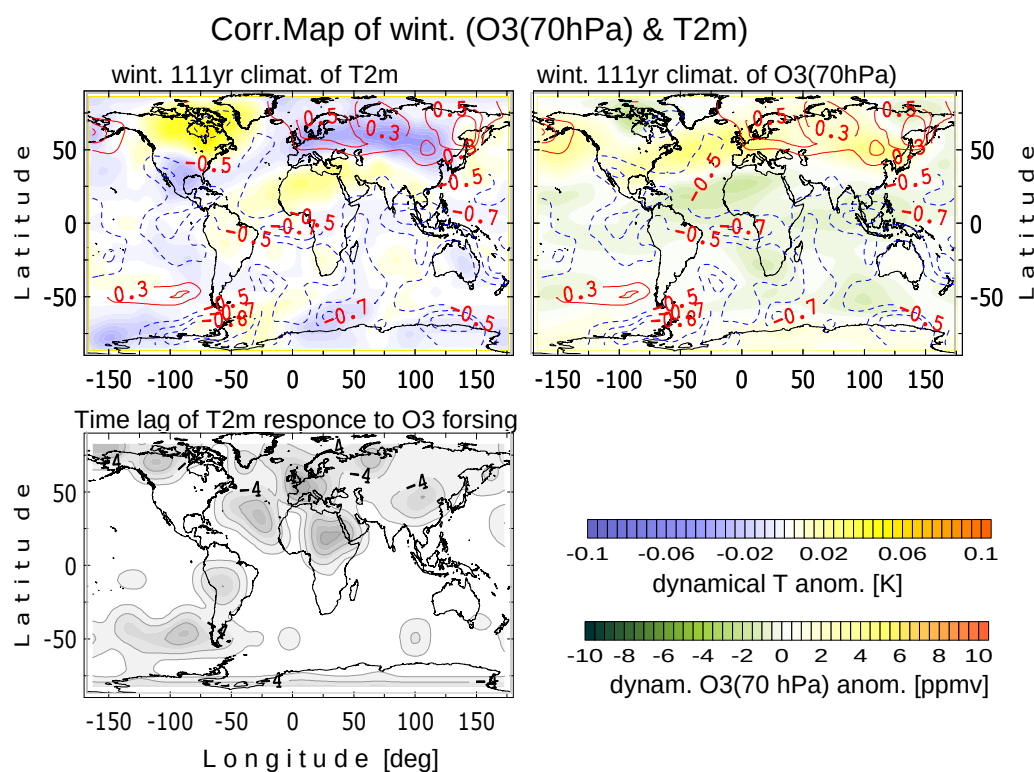


Fig. 6.5a (upper panels) Centennial correlation of O₃ mixing ratio at 70 hPa with near surface air temperature (contours), calculated for period 1900-2010. Centennial climatology of temperature (left) and ozone (right) are added as a background coloured shading; (lower panel) Time delay of surface temperature response to O₃ forcing. Data source: ERA 20 century.

Теоретичния анализ в параграф 6.2.3 е последван от статистически анализ на влиянието на озона на 70 hPa върху приземната температура (Фиг. 6.5a). Прави впечатление, че ковариациите между озона и температурата в преобладаващата част от земното кълбо (например тропиците и част от

умерените и високите ширини) са в антифаза и без отместване във времето (виж долната част на Фиг. 6.5a).

Отчитайки системното намаление на озона през изминалия век (виж Фиг. 6.5b), озоновия механизъм за влияние върху приземната температура предвижда ръст на приземната температура. Това заключение точно съответства на регистрирано през 20 век глобално затопляне. В някои региони на Северното и Южното полукълбо, обаче, се наблюдават зони със синфазно изменение на озона и температурата във времето, което на пръв поглед е в противоречие с озоновия механизъм. Тук е мястото да отбележим, че при наличието на тренд в данните, той определя знака на коефициента на корелация. Справката с Фиг. 6.5b показва, че за разлика от глобалното намаление в плътността на озона, на 50° северна ширина се наблюдава ръст в концентрацията на озона в ниската стратосфера. Следователно, положителния тренд в озона и в приземната температура определят положителния знак на корелацията между тях

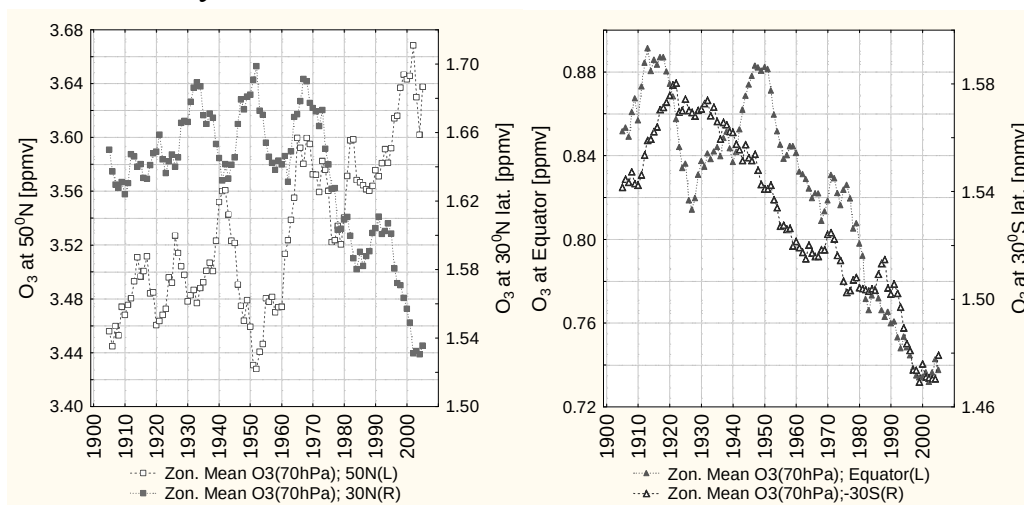


Fig. 6.5b Time series of zonally averaged winter ozone mixing ratio at 70 hPa, covering the period 1900–2010 at different latitudes; (left) O_3 at $50^{\circ}N$ (red curve) and $30^{\circ}N$ (blue curve) latitudes; (right) O_3 at the Equator (light blue) and $30^{\circ}S$ lat. (dark blue). Data source: ERA 20 century.

От друга страна, анализа на времевите редове показва, че в рамките на десетилетна времева скала, озона и водната пара във ВТНС (и респективно приземната температура) продължават да се изменят в противофаза (Фиг. 5.17 и 6.4), независимо от положителния векови тренд.

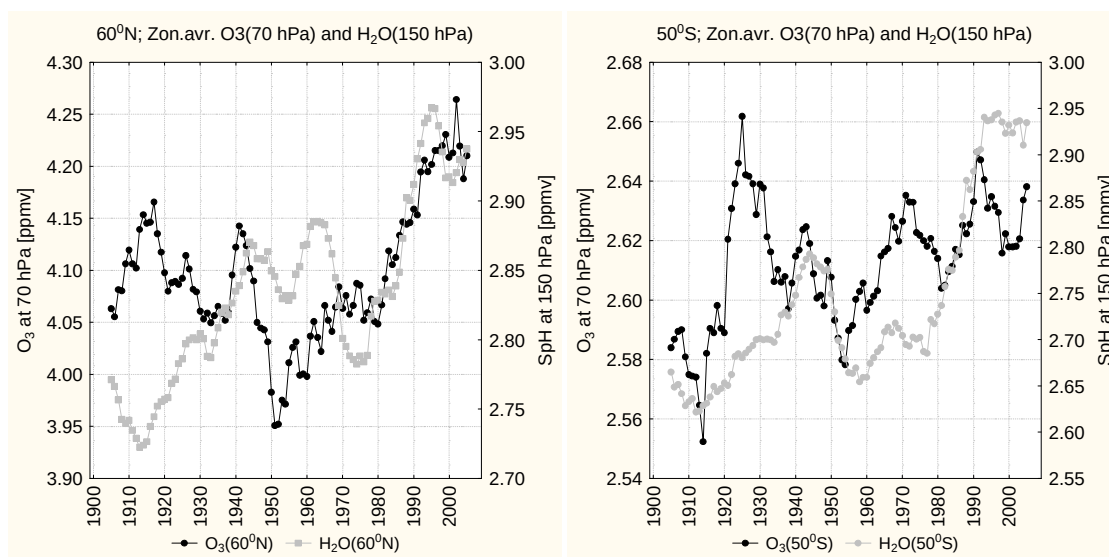


Fig. 6.4 Time series of zonally averaged winter O_3 mixing ratio at 70 hPa and specific humidity at 150 hPa for Northern (left) and Southern (right) hemispheres. Data source: ERA 20 century.

Следователно, в съответствие с озоновия механизъм, можем да очакваме, че положителните отклонения на O_3 от нелинейния векови тренд, ще се проектират върху земната повърхност като отрицателни температурни аномалии. Фиг. 6.5а (ляв панел) потвърждава това очакване и показва, че синфазната ковариация между озона и приземната температура много добре очертава областите с отрицателни температурни аномалии. Нещо повече, десния панел на Фиг. 6.5а от своя страна илюстрира, че отрицателните температурни аномалии много добре съответстват на положителните аномалии в озона на 70 hPa.

Съобразно предположения от нас механизъм, влиянието на озона върху приземната температура е неизменно свързано с количеството водна пара във високата тропосфера. Ето защо Фиг. 6.6а представя проекцията на корелационната карта на озона и водната пара върху климатологичното разпределение на температурните аномалии на въздуха при земята. И тук синфазните вариации (положителния знак, както бе отбелязано по-горе се определя от положителния тренд в двете променливи величини) рамкират доста точно отрицателните температурни аномалии. Долната част на Фиг. 6.6а, пък дава информация за време-закъснението на водната пара по отношение на измененията в озона. Вижда се, че измененията във водната пара следват измененията на озона със закъснение от 6-7 години, аналогично на времезакъснението видимо на Фиг. 5.17.

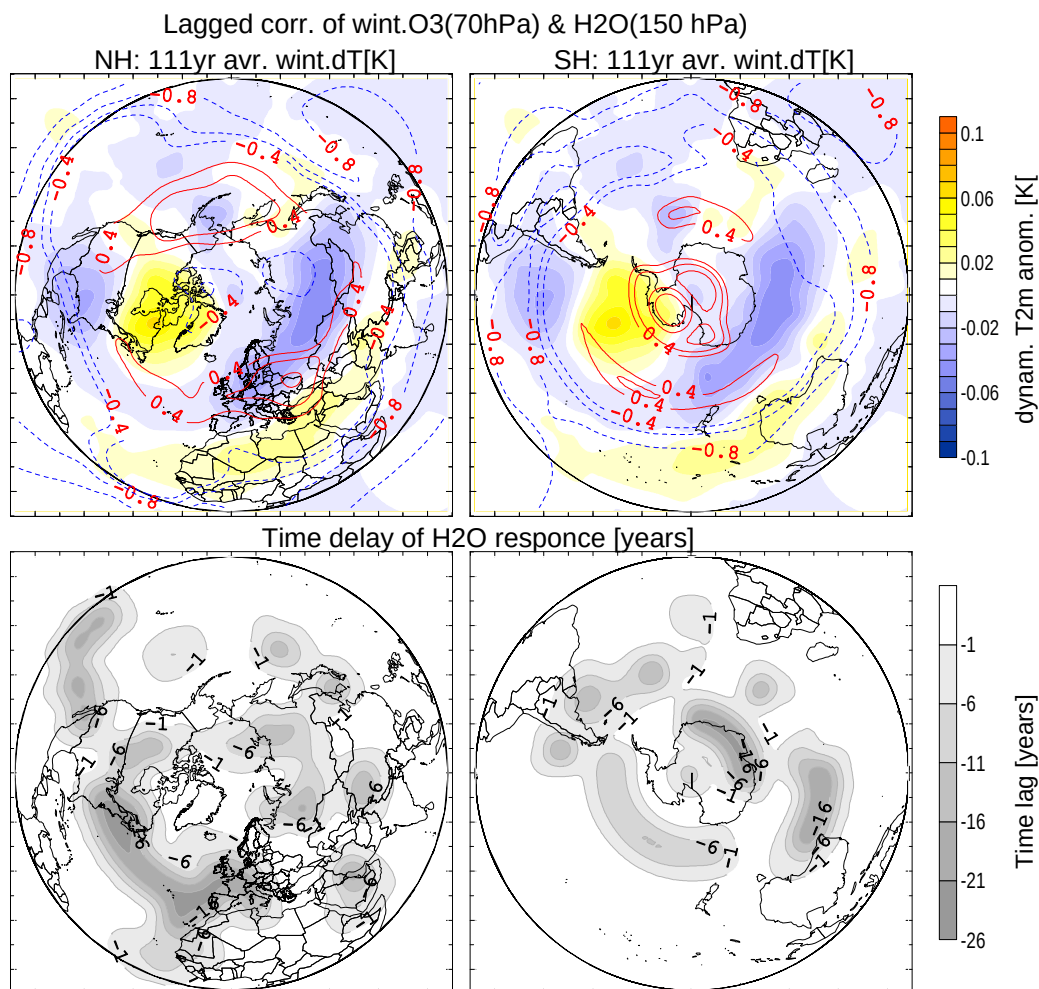


Fig. 6.6a Contour maps of statistically significant at 95% correlation coefficients between winter O₃ (70 hPa) and specific humidity (150 hPa), calculated over the period 1900-2010; continuous lines denote the positive correlation, dashed lines – negative one. The 111-year climatology of near surface dynamical winter temperature anomalies for both hemispheres (coloured shading) is shown as a background. Data source: ERA 20 century.

В допълнение е направено сравнение между корелационните карти: (1) на ГКЛ и озона в ниската стратосфера и (2) на озона и водната пара в близост до тропопаузата (Фиг. 6.7). Впечатляващо е много доброто съвпадение на зоните на силна свързаност между ГКЛ и озона, и добре изразения контрол на озона върху водната пара в близост до тропопаузата. Този резултат е още една индикация, че силната връзка между озона и водната пара в пръстеновидния регион около 50-55°N е обусловена от въздействието на ГКЛ върху плътността на озона.

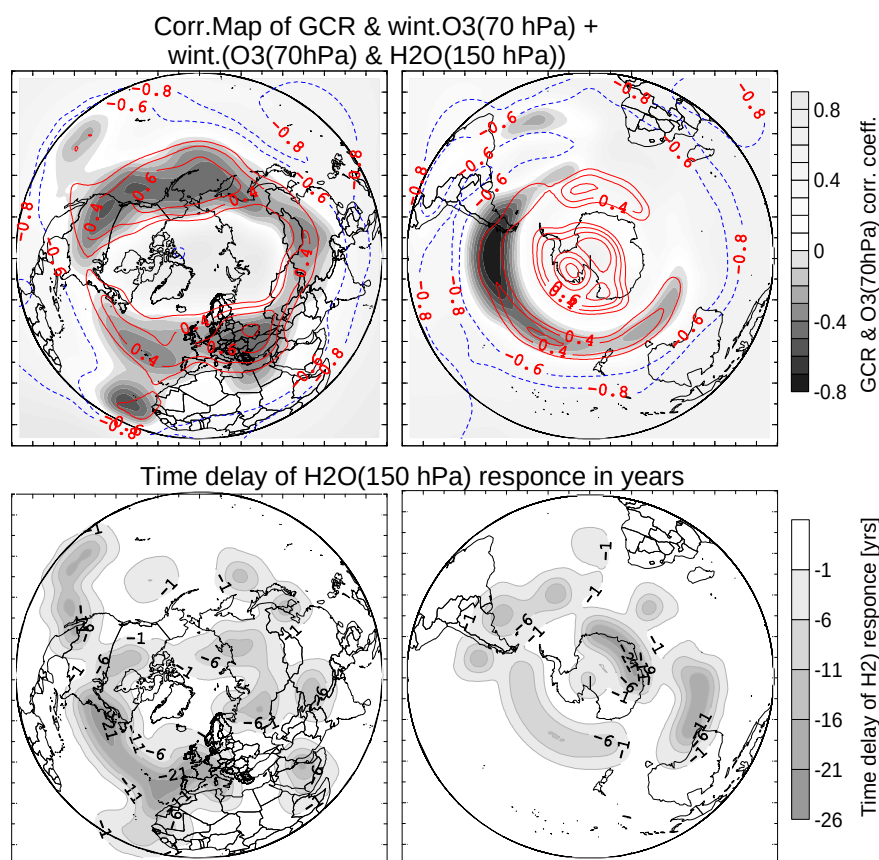


Fig. 6.7 (upper panel) Comparison of winter O₃ at 70 hPa covariances with (i) GCR (shading) and (ii) water vapour at 150 hPa (contours), calculated over the period 1900-2010; (lower panel) Time delay of surface temperature response to O₃ forcing.

В заключение, разнообразните статистически анализи, проведени в параграф 6.2.3 показват, че синхронните вариации между ГКЛ и озона във високата тропосфера и ниската стратосфера се проектират върху приземната температура на Земята (Фиг. 6.5 и 6.6). Основно връзката между озона и температурата е в противофаза, но съществуват области в Северното и Южното полукълбо, в които озона и температурата се изменят синфазно, макар че температурата „изостава“ с период от 4-7 години. В съответствие с озоновия механизъм за влияние върху приземната температура, измененията в озона предизвикват съответни изменения в количеството на водната пара във високата тропосфера, които от своя страна влияят върху силата на парниковия ефект и съответно върху температурата на земната повърхност. Това обяснява забавянето в реакцията на температурата спрямо измененията в озона.

Статистическият анализ на свързаността между озона и водната пара във ВТНС показва, че тя е особено силна в прехода между средни и високи ширини (Фиг. 6.6), където се наблюдава ръст в концентрацията на озона през цялото столетие. Тази връзка е по-силна през зимата, вероятно поради по-високото съдържание на озон, и много добре очертава отрицателните аномалии в приземната температура (Фиг. 6.6). Сравнението с пространственото разпределение на ковариацията между ГКЛ и озона показва, че комбинираното влияние на озона и водната пара върху приземната температура е свързано с високоскоростните частици достигащи до ниската стратосфера.

В последния параграф на шеста глава са представени моделни резултати от числени експерименти с модела RegCM, целта на които бе да се изследва реакцията на приземната температура на изменения в плътността на озона между тропопаузата и горнага граница на модела, т.е. 50 hPa. Показано е, че увеличаване количеството на озона води до понижение на приземната температура на въздуха, точно както предвижда озоновия механизъм (Фиг. 6.8).

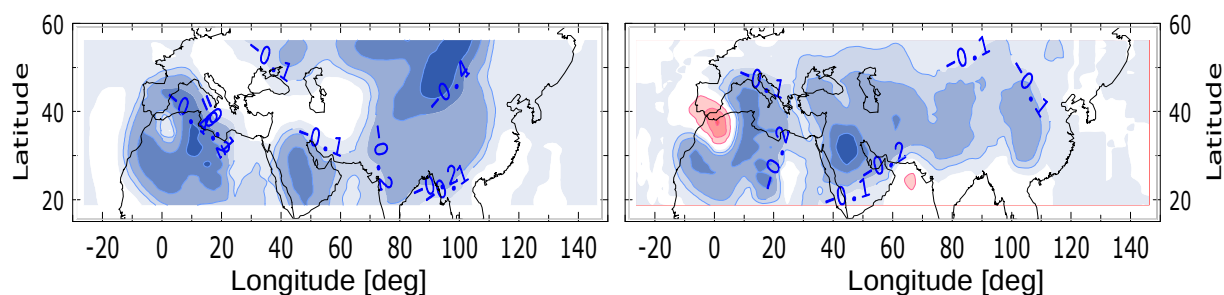


Fig. 6.8 Surface cooling in the model experiment with increased ozone just above the tropopause, shown respectively for winter (left column) and summer (right column).

Анализа на настъпилите промени в количеството водна пара, наблюдавани на четирите най-високи моделни нива, в експеримента с допълнителен озон, показва видимо намаление в сравнение с контролния експеримент (Фиг. 6.9). Този резултат е отлично потвърждение на предложението в параграф 6.2.2 механизъм, според който озона е в състояние да влияе на количеството водна пара във високата тропосфера, която от своя страна има най-голям принос в парниковия ефект на атмосферата и респективно във вариациите на приземната температура.

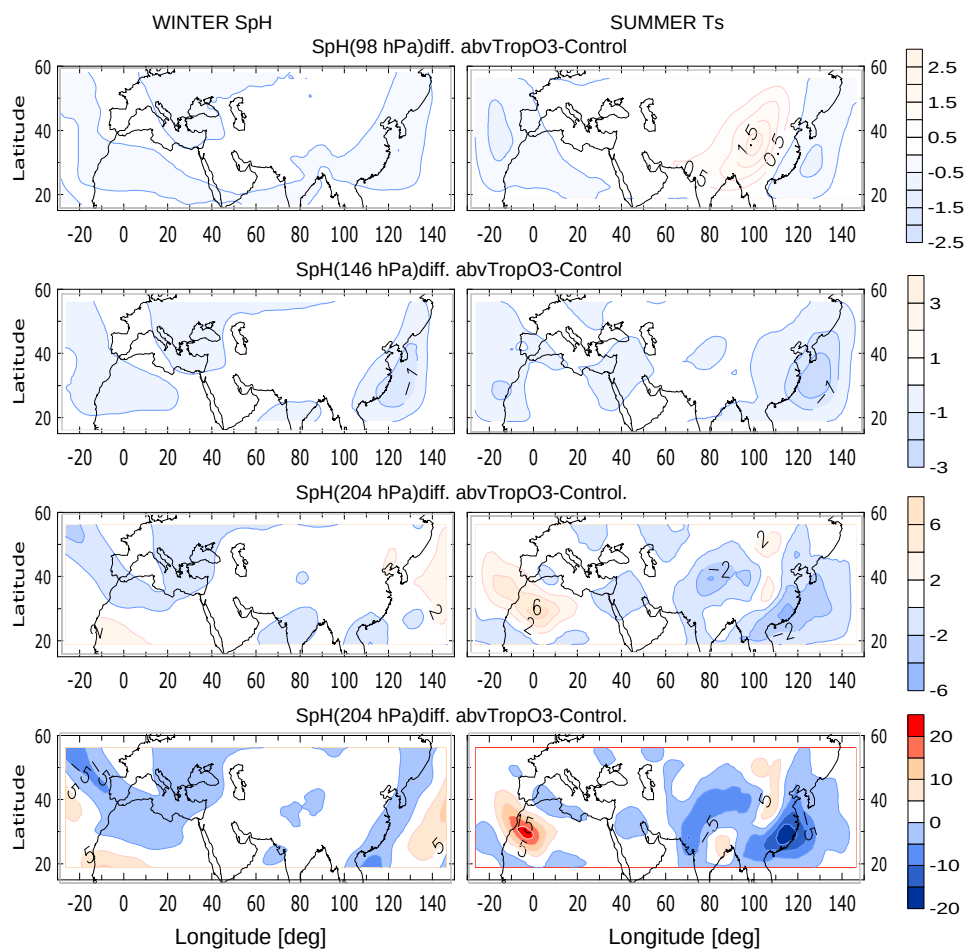


Fig. 6.9 Water vapour response to an increased O_3 mixing ratio just above the tropopause, i.e. its deviations from the control experiment in $[\mu\text{g/kg}]$; left column is for winter, right one – for summer season.

ЛИТЕРАТУРА

- Bakhmutov 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 International* 149, 4–11.
- Brigham-Grette J. Melles, M., Minyuk P., Andreev A., Tarasov P., DeConto R., Koenig S., Nowaczyk N., Wennrich V., Rosén P., Haltia E., Cook T., Gebhardt C., Meyer-Jacob C., Snyder J., Herzschuh U., 2013. Pliocene Warmth, Polar Amplification, and Stepped Pleistocene Cooling Recorded in NE Arctic Russia, *Science*, 340, 1421–1426.
- Bucha V., Taylor R.E., Berger R., Haury E.W., Geomagnetic Intensity: Changes during the Past 3000 Years in the Western Hemisphere, *Science*, 168, 111–114, 1970.
DOI: 10.1126/science.168.3927.111
- Courtillot, V., Le Mouél, J., Ducruix, J., Cazenave, A., 1982. Magnetic secular variation as a precursor of climatic change. *Nature*, **297**: 386–387.

- Courillot, V., Gallet, Y., Le Mouel, J.L., Fluteau, F., Genevey, A., 2007. Are there connections between the Earth's magnetic field and climate? *Earth Planet. Sci. Lett.* 253: 328–339, doi:10.1016/j.epsl.2006.10.032.
- de F. Forster P.M.; Shine K. Radiative forcing and temperature trends from stratospheric ozone changes *J. Geophys. Res.* **1997**, 102(D9), 10841.
- de Forster, P.M., Tourpali, K., 2001. Effect of tropopause height changes on the calculation of ozone trends and their radiative forcing. *J. Geophys. Res.* 106(D), 12241–12251.
- Elsasser W., Ney E.P., Winckler J.R., Cosmic-Ray Intensity and Geomagnetism, *Nature* 178, 1226–122 (1956), doi:10.1038/1781226a0
- 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, doi:10.1016/j.epsl.2005.04.045.
- Gauss, M. et al. 2006. Radiative forcing since preindustrial times due to ozone change in the troposphere and the lower stratosphere, *Atmos. Chem. Phys.* 6, 575–599.
- Harrison C.G.A., Funnell B.M., Relationship of paleomagnetic reversals and micropaleontology in two late cenozoic cores from the Pacific Ocean, *Nature* **204**, 566 (1964); doi:10.1038/204566a0
- Hood L.L., Zaff D.A., 1995. Lower stratospheric stationary waves and the longitude dependence of ozone trends in winter, *J. Geophys. Res.*, 100, D12, 25,791–25,800.
- Inamdar, A.K., Ramanathan, V., Loeb, N.G., 2004. Satellite observations of the water vapour greenhouse effect and column longwave cooling rates: Relative roles of the continuum and vibration-rotation to pure rotation bands, *J. Geophys. Res.*, 10, D06104, doi:10.1029/2003JD003980.
- IPCC, 2013. (Intergovernmental Panel on Climate Change), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis—Contribution of Working Group I*, edited by T. F. Stocker et al., Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K. and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Kilifarska N.A., V.G. Bakhmutov, G.V. Melnyk, Geomagnetic influence on Antarctic climate – evidence and mechanism, *Int. Rev. Phys.*, 7 (3), 242–252, 2013.
- Kilifarska N.A., V.G. Bakhmutov, G.V. Melnyk, Geomagnetic Field and Climate: Causal Relations with Some Atmospheric Variables, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2015, Vol. 51, No. 5, pp. 768–785.
- Kilifarska N.A., 2013. An autocatalytic cycle for ozone production in the lower stratosphere initiated by Galactic Cosmic rays, *Compt. rend. Acad. bulg. Sci.*, 66(2), 243–252.
- Kilifarska N.A., 2017. Hemispherical asymmetry of the lower stratospheric O₃ response to galactic cosmic rays forcing, *ACS Earth and Space Chemistry*, v.1; DOI: 10.1021/acsearthspacechem.6b00009.
- King J.W., Weather and Earth's magnetic field, *Nature*, 247, 131–134, 1974.
- Kobashi T., Kawamura K., Severinghaus J.P., Barnola J.M., Nakaegawa T., Vinther B.M., Johnsen S. J., Box J.E., 2011. High variability of Greenland surface temperature over the past 4000 years estimated from trapped air in an ice core, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L21501, doi:10.1029/2011GL049444.
- Korte M., Constable C.G., 2005. Continuous geomagnetic field models for the past 7 millennia: 2. CALS7K, *Geochem., Geophys. and Geosyst.*, 6(1), Q02H16, doi:10.1029/2004GC000801
- Manabe S.; Strickler R.F. Thermal equilibrium of the atmosphere with a convective adjustment, *J. Atmos. Sci.* **1964**, 21, 361–385.
- Manabe S.; Wetherald R.T. Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity, *J. Atmos. Sci.* **1967**, 24, 241–259.
- Mishev A., P.I.Y. Velinov, 2015. Ionization rate profiles due to solar and galactic cosmic rays during GLE 59 Bastille day 14 July, 2000. *C.R. Acad. Bulg. Sci.*, **68**, 3, 359–366.
- North, G.R., Eruhimova, T.L., 2009. *Atmospheric thermodynamics: elementary physics and chemistry*, Cambridge University Press.
- Pan, L., Solomon, S., Randel, W., Lamarque, J-F, Hess, P., Gille, J., Chiou Er-W., Patrick, M., McCormic, 1997. Hemispheric asymmetries and seasonal variations of the lowermost stratospheric water vapour and ozone derived from SAGE II data. *J. Geophys. Res.* 102(D23), 28,177–28,184.

- Peters D.H.W., Gabriel D.H.W., Entzian G., 2008. Longitude-dependent decadal ozone changes and ozone trends in boreal winter months during 1960–2000, *Ann. Geophys.*, 26, 1275–1286.
- Pierce D.W., Barnett T. P., Fetzner E.J., Gleckler P. J., 2006. Three-dimensional tropospheric water vapor in coupled climate models compared with observations from the AIRS satellite system, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L21701, doi:10.1029/2006GL027060.
- Ramanatan V.; Callis L.B.; Boucher R.E., 1976, Sensitivity of surface temperature and Atmospheric temperature to perturbations in the Stratospheric ozone and Nitrogen dioxide, *J. Atmos. Sci.*, 33, 1092.
- Randel, W. J., Wu, F., Forster, P., 2007. The Extratropical Tropopause Inversion Layer: Global Observations with GPS Data, and a Radiative Forcing Mechanism, *J. Atmos. Sci.* 64, 4489–4496.
- Risi C., Noone D., Worden J., Frankenberg C., Stiller G., Kiefer M., Funke B., Walker K., Bernath P., Schneider M., Bony S., Lee J., Brown D., Sturm C., 2012. Process-evaluation of tropospheric humidity simulated by general circulation models using water vapor isotopic observations: 2. Using isotopic diagnostics to understand the mid and upper tropospheric moist bias in the tropics and subtropics, *J. Geophys. Res.*, 117, D05304, doi:10.1029/2011JD016623
- Seidel, D.J., Randel, W.J., 2006. Variability and trends in the global tropopause estimated from radiosonde data. *J. Geophys. Res.* 111, D21101 doi:10.1029/2006JD007363.
- Spencer, R.W., Braswell, W.D., 1997. How Dry is the Tropical Free Troposphere? Implications for Global Warming Theory, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 78(6), 1097–1106.
- Steblova R. Asymmetry of the Ozonosphere // EOS Trans. AGU. 1978. V. 79 (45). Fall Meet. Suppl. P. F79.
- Steblova R.C., 2001. North-south asymmetry of the ozone layer, *Reports RAN*, 379(5), 675–679.
- Stuber N., Ponater M., Sausen R., 2001, Is the climate sensitivity to ozone perturbations, enhanced by stratospheric water vapour feedback? *Geophysical Research Letters*, 28(15), 2887–2890.
- Usoskin I.G., Mursula K., Solanki S., Schussler M., Kovaltsov G.A., A physical reconstruction of cosmic ray intensity since 1610, *J. Geophys. Res.*, 107(A11), 1374, doi:10.1029/2002JA009343, 2002
- Usoskin I.G.; Gladysheva O.G.; Kovaltsov G.A., 2004. Cosmic ray-induced ionization in the atmosphere: spatial and temporal changes, *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.*, 66, 1791–1796.
- Velinov P.I.Y., Asenovski S., Kudela K., Lastovicka J., Mateev L., Mishev A., Tonev P., 2013, Impact of cosmic rays and solar energetic particles on the Earth's ionosphere and atmosphere, *J. Space Weather Space Clim.*, 3, A13, doi:10.1051/swsc/2013036.
- Vieira L.E.A., da Silva L.A., 2008. On the nature of the longitudinal anomaly of the southern hemisphere lower stratospheric temperature, In: N. Gopalswamy, D.F. Webb (editors), *Proceedings IAU Symposium*, 257: 511–515.
- Wirth, V., 1993. Quasi-stationary planetary waves in total ozone and their correlation with lower stratospheric temperature. *J. Geophys. Res.* 98, 8873–8882.
- Wollin G., Ericson D.B., Ryan W.B.F., Variations in magnetic intensity and climate changes, *Nature*, 232, 549–550, 1971.
- Young, J.A., 2003. Static stability, in: J.R. Holton, J.A. Curry, J.A. Pyle (Editors), *Encyclopaedia of Atmospheric Sciences*. Academic Press, v.5: 2114–2120.
- US Standard Atmosphere, 1976. NOAA, NASA, USAF, Washington D.C.

ОСНОВНИ РЕЗУЛТАТИ И ИЗВОДИ

1. Представено е теоретическо обяснение на дължинните вариации в геомагнитния контрол върху високо-енергетичните частици способни да преодолеят геомагнитното поле и да проникват в ниските слоеве на земната атмосфера.
2. Открит е нов източник на озон в ниската стратосфера, иницииран от ниско-енергийните електрони в максимума на Регенерер-Пфотсер.
3. Установено е съществуването на пространствено-времева зависимост между геомагнитното поле, галактичните космични лъчи (ГКЛ) и някои климатични параметри (приземната температура, концентрацията на озон и водна пара около тропопаузата).
4. Предложен е нов механизъм свързващ вариациите на геомагнитното поле с тези на озона, водната пара и приземната температура, според който:
 - високо енергийните частици бомбардиращи непрекъснато земната атмосфера биват фокусирани от нееднородното геомагнитно поле в определени райони на Земята;
 - достигайки до ниските слоеве на атмосферата тези частици създават множество вторични електрони, които са в състояние да активират определени йонно-молекулярни реакции;
 - при определени условия тези йонно-молекулярни реакции могат да образуват озон, като необходимото условие за това е атмосферата да е достатъчно суха. Такива условия се наблюдават точно над тропопаузата, в резултат на т. нар. “freeze drying” (изсушаване чрез замръзване) при преминаването на въздушните маси през тропопаузата;
 - под тропопаузата активираните йонно-молекулярни реакции обикновено разрушават озона;
 - вариациите в концентрацията на озона над тропопаузата влияят върху температурата и както и на количеството водна пара във високата атмосфера – посредством влажно-адиабатния температурен градиент;

- водната пара във високата тропопауза има решаващ принос (осигуряваща около 2/3 от приноса на всички парникови газове) в парниковия ефект. Следователно, колебанията в концентрацията ѝ водят до неговото усилване или отслабване.

5. Съществуват две големи зони, в които свързаността (в рамките на разглежданото столетие) между озона и водната пара в близост до тропопаузата е особено силна – (1) на екватора и тропиците и (2) в зоната на преход между високи и ниски ширини ($\sim 55^{\circ}$) в двете полукълба.

В първата зона съвместното влияние между озона и водната пара е без задръжка във времето и там не можахме да установим, кой е водещият фактор в това взаимодействие.

Във втората зона, обаче водещ е озона и измененията в плътността му инициират съответни промени във водната пара. По всичко изглежда, че водещата роля на озона в тази зона се дължи на факта, че единствено в нея се наблюдава системно увеличение в плътността на озона на 70 hPa през целия 20 век. Силната кохерентност между озона и водната пара в тази зоната се проектира върху земната повърхност и очертава много добре област с отрицателни температурни аномалии при земята.

Нещо повече тези зони (по една във всяко полукълбо, като тази в южното е по-слабо развита) са единствените, в която ГКЛ и озона се изменят в противофаза. Това подсказва, че основен източник на озон в ниската стратосфера не са първичните галактични космични лъчи, а частиците захванати в радиационните пояси на Земята.

6. Валидността на новият механизъм е проверена чрез различни числени експерименти с регионалния климатичен модел RegCM 4.6.0.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 (Списък с публикациите по дисертацията)

I. В научни списания

1. Kilifarska N.A., Bakhmutov V.G., Melnyk G.V., "Galactic cosmic rays and tropical ozone asymmetries", *Compt. rend. Acad. bulg. Sci.*, 70(7), 1003-1010, 2017.
2. Kilifarska N.A., Hemispherical asymmetry of the lower stratospheric O₃ response to galactic cosmic rays forcing, *ACS Earth and Space Chemistry*, v.1, 2017. DOI: 10.1021/acsearthspacechem.6b00009.
3. Килифарска Н.А., Бахмутов В.Г., Мельник Г.В. Связь изменений климата с геомагнитным полем. Часть 3: Северное и Южное полушария, *Геофизический журнал*, Инстит. Геофизики, НАН, 38 (3), 52-71, 2016.
4. Килифарска Н.А., Бахмутов В.Г., Мельник Г.В. Связь изменений климата с геомагнитным полем. Часть 2: возможный механизм, *Геофизический журнал*, Инстит. Геофизики, НАН, 37 (5), 66-92, 2015.
5. Kilifarska N.A., Bi-decadal solar influence on climate, mediated by near tropopause ozone, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 136, 216-230, 2015, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2015.08.005i>
6. Kilifarska N.A., V.G. Bakhmutov, G.V. Melnyk, Geomagnetic Field and Climate: Causal Relations with Some Atmospheric Variables, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2015, Vol. 51, No. 5, pp. 768–785.
7. Килифарска Н.А., Бахмутов В.Г., Мельник Г.В., Геомагнитное поле – климат: причинно-следственные связи в изменении некоторых параметров атмосферы, *Физика Земли*, № 5, 160-178, 2015.
8. Бахмутов В.Г., Мартазинова В.Ф., Килифарска Н.А., Мельник Г.В., Иванова Е.К., Связь изменений климата с геомагнитным полем. Часть 1: пространственно-временная структура магнитного поля земли и климата в XX столетии, *Геофизический журнал*, Инстит. Геофизики, НАН, 36 (1), 81-104, 2014.
9. Tassev J., Kilifarska N.A., Tomova D., Statistical analysis of solar proton flux influence on the thermodynamics of the middle atmosphere in the Northern Hemisphere, *Compt. rend. Acad. bulg. Sci.*, 67(1), 95-100, 2014.
10. Kilifarska N.A., V.G. Bakhmutov, G.V. Melnyk, The mystery of Antarctic climate change and its relation to geomagnetic field, *Ukrainian Antarct. J.*, 12, 45-55, 2013.
11. Kilifarska N.A., V.G. Bakhmutov, G.V. Melnyk, Energetic particles influence on the Southern Hemisphere ozone variability, *Compt. rend. Acad. bulg. Sci.*, 66(11), 1613-1622, 2013.
12. Kilifarska N.A., V.G. Bakhmutov, G.V. Melnyk, Geomagnetic influence on Antarctic climate – evidences and mechanism, *Int. Rev. Phys.*, 7 (3), 242-252, 2013.
13. Kilifarska N.A. An autocatalytic cycle for ozone production in the lower stratosphere initiated by Galactic Cosmic rays, *Compt. rend. Acad. bulg. Sci.*, 66(2), 243-252, 2013.
----- преди 2013 -----
14. Kilifarska N.A. Mechanism of lower stratospheric ozone influence on climate, *IREPHY*, 6 (3), 279-290, 2012.
15. Kilifarska N.A. Ozone as a mediator of galactic cosmic rays' influence on climate, *Sun And Geosphere*, v.7 (2), 97-102, 2012.
16. Kilifarska N.A. Climate sensitivity to the lower stratospheric ozone variations, *J. Atmos.Sol-Terr.Phys.*, 90–91, 9–14, 2012.

17. Kilifarska N.A. Nonlinear re-assessment of the long-term ozone variability during 20th century, *Compt. rend. Acad. bulg. Sci.*, 64, 1479-1488, 2011.
18. Kilifarska N.A., Mechanisms and Modelling of a 22 Year Cycle in the Stratospheric Winter Time Ozone Variability, *Compt. rend. Acad. bulg. Sci.*, 64, No 7, 1007-1115, 2011.
19. Kilifarska N.A. Long –term variations in the Stratospheric Winter Time Ozone Variability – 22 year cycle, *Compt. rend. Acad. bulg. Sci.*, 64, No 6, 867-874, 2011.
20. Werner R., Stebel K., Hansen H.G., Hoppe U.-P., Gausa M., Kivi R., von der Gathen P., Orsolini Y., **Kilifarska N.**, Study of the seasonal ozone variations at European high latitudes, *Adv. Space Res.*, 47, 740–747 2011.
21. Kilifarska N.A., Mechanism of Solar influence on the winter time Polar Atmosphere, *Sun and Geosphere*, v.3, No.2, 72-80, 2008, ISSN: 1819-0839.
22. Kilifarska N.A., P. Mukhtarov, External forcing and internal variability of the upper troposphere-lower stratospheric temperature, *Bulgar. Geophys. J.*, 20-27, 2006.
23. Kilifarska N.A., Solar Variability and Climate–UTLS amplification of Solar Signal, *Sun and Geosphere*, v.1, No.1, 51-55, 2006, ISSN: 1819-0839.
24. Kilifarska N.A. Solar Modulation of Temperature, Water Vapour and Ozone Seasonal Cycle in the Upper Troposphere / Lower Stratosphere, *Compt.Rend.de l'Acad. Bulgar. des Sci.* , 58, No.10, 1151-1158, 2005, ISSN:1310-1331.
25. Velinov P.I.Y., Mateev L., Kilifarska N.A., 3-D model for cosmic ray planetary ionisation in the middle atmosphere , *Annal. Geophys.*, 23, No.9, 3043-3046, 2005, ISSN: 0992-7689.

II. В сборници от конференции

1. Килифарска Н.А., Бахмутов В.Г., Мельник Г.В., Геомагнитное поле – климат в XX столетии: причинно-следственные связи и возможный механизм, конференция: Палеомагнетизм и магнетизм горных пород: теория, практика, эксперимент, Борок, Россия, 10-12 ноября, 2015.
2. Kilifarska N.A., Bakhmutov V.G., Melnyk G.V., Mozgova T., Geomagnetic field–Ozone influence on the surface air temperature in epicentral regions of Balkan's earthquakes, Proceedings of the 4th workshop of the EU FP7 project *BlackSeaHazNet*, December 2013, **Sofia**, Bulgaria, pp.187-197, 2014.
3. Kilifarska N.A., Bakhmutov V.G., Melnyk G.V., Global warming or climate variability – the role of geomagnetic field and lower stratospheric ozone, Proceedings of the 4th workshop of the EU FP7 project *BlackSeaHazNet*, December 2013, **Sofia**, Bulgaria, pp. 176-186, 2014.
----- преди 2013 -----
4. Kilifarska N. A., Climate variability – a concert for O₃, H₂O vapour and “orchestra”, Proceedings of conference on *Problems and achievements of long-range predictions*, October 2011, **Kiev**, 195-208, Kiev, 2012. УДК: 551.509; 551.509.3; 551.509.314.4; 550.38.
5. Kilifarska N.A. Statistical methods for analysis of climatic time series and factors controlling their variability, Proceedings of the 2nd workshop of the EU FP7 project *BlackSeaHazNet*, September 2011, **Tbilisi**, Georgia, 111-124, 2012, ISSN 2233-3681.
6. Kilifarska N.A. Latitudinal -Longitudinal Dependence of Stratospheric Response to Particles' Forcing in January 2005, Proceedings of the 1st workshop of the EU FP7 project *BlackSeaHazNet*, May 2011, **Ohrid**, FYRO Maredonia, ISBN 978-9989-631-04-7, v.1, 77-101, 2011.

7. Kilifarska N.A., Y.K. Tassev, Atmospheric evidences for solar protons influences on energetics of the stratosphere-troposphere system, Proceedings of Fundamental Space Research conference, **Sunny Beach**, Bulgaria, 21-28 Sep 2008, 188-192.
8. Verner R., Stebel K., Hansen H.G., Hoppe U.P., Gausa M., Kivi R., von der Gathen P., **Kilifarska N.**, Orsolini Y., Ozone variations in the Tropospheric inversion layer at European high latitudes, Proceedings of Fundamental Space Research conference, **Sunny Beach**, Bulgaria, 21-28 Sep 2008, 403-407.

III. Доклади на конференции

1. N. Kilifarska, About the regionality of climate variations and its explanation, Eight workshop: "Solar influence on the magnetosphere, Ionosphere and atmosphere", May 30 –June 03, 2016, Sunny Beach, Bulgaria.
2. **N. Kilifarska**, R. Nedialkov, Ts. Velichkova, Pre-earthquake variations of some geophysical parameters in solar and geomagnetically quiet periods, VIII workshop on "Solar influence on the magnetosphere, Ionosphere and atmosphere", May 30 –June 03, 2016, Sunny Beach, Bulgaria.
3. В.Г. Бахмутов, **Н.А. Килифарская**, Г.В. Мельник. Как геомагнитное поле может влиять на изменения климата / Geoinformatics - 2016, 10 - 13 May 2016, Kiev, Ukraine, ВАГ, EAGE, Тези, CD-ROM, 9997-RUS 5с.
4. Г. Мельник, В. Бахмутов, **Н. Килифарска**. Можливий зв'язок змін геомагнітного поля і клімату та його особливості у різних півкулях землі, «Геофізичні технології прогнозування та моніторингу геологічного середовища" Матеріали VI Міжнародної наукової конференції, 20-23 вересня 2016. текст. – Львів: СПОЛІОМ, 2016. – 310с. С. 184 – 186. <http://www.cb-igph.lviv.ua/indexk.htm>
5. Килифарска Н.А., Бахмутов В.Г., Мельник Г.В., Геомагнитное поле – климат в XX столетии: причинно-следственные связи и возможный механизм, конференция: Палеомагнетизм и магнетизм горных пород: теория, практика, эксперимент, Борок, Россия, 10-12 ноября, 2015.
6. Kilifarska N.A., Регионални изменения на климата; динамика в еволюцията на магнитното поле, 100 years from the prof. I. Petkov birth day, 30 Oct. 2015, SU "Kl. Ohridski", Sofia.
7. Kilifarska N.A., Strengths and weaknesses of existing mechanisms for highly energetic particles' influence on climate, Conference on Sun-Climate Connections, Kiel, 16-19.3.2015, Germany.
8. N.A. Kilifarska, Solar influence on climate mediated by near tropopause ozone, 5th IAGA/ICMA/SCOSTEP Workshop on 'Vertical Coupling in the Atmosphere-Ionosphere System', 11-15 August, 2014, Antalya, Turkey
9. Kilifarska, N. A., Bakhmutov, V.G., Melnyk, G.V. Geomagnetic field and climate variability: possible mechanism of connection / 10th International Conference "PROBLEMS OF GEOCOSMOS" Book of Abstracts St. Petersburg, Petrodvorets, October 6-10, 2014, St. Petersburg, 2014. P.161-162 http://geo.phys.spbu.ru/geocosmos/book_of_abstracts.pdf
10. Maksimenko, O.I., Bakhmutov V.G., Shenderovskaya, O.Ya., Kilifarska, N.A. Trend changes of Sq-variations of geomagnetic field at the observatory "Akademic Vernadsky" (AIA) / 10th International Conference "PROBLEMS OF GEOCOSMOS" Book of Abstracts St. Petersburg, Petrodvorets, October 6-10, 2014, St. Petersburg, 2014. P. 172-173 http://geo.phys.spbu.ru/geocosmos/book_of_abstracts.pdf
11. N.A. Kilifarska, V.G. Bakhmutov, G. V. Melnyk, T. Mozgova, Variability of surface air temperature and earthquakes in Balkan region, BlackSeaHazNet workshop, 16-19 Dec, 2013, **Sofia**, Bulgaria.
12. N.A. Kilifarska, V.G. Bakhmutov, G. V. Melnyk, Earth's magnetic field and climate – real link or coincidental statistics, BlackSeaHazNet workshop, 16-19 Dec, 2013, **Sofia**, Bulgaria.

13. Kilifarska N., Bakhmutov V., Melnik G., Does geomagnetic field influence climate variability?" BlackSeaHazNet workshop, 7 November, 2013, **Tbilisi**, Georgia.
14. Kilifarska N.A., Climate Variability Initiated by Helio- and Geomagnetic fields–Evidences and Mechanisms, TOSCA MS meeting, 29 Sept–4 Oct, 2013, **Prague**, Czech Republic.
<http://www.ufa.cas.cz/html/tosca/participants.php>
15. Kilifarska N.A., Near tropopause O₃ – variability and climate implication, 12th Scientific Assembly of the IAGA, August 25-31, 2013, **Mérida**, México.
16. Kilifarska, Bakhmutov, Melnik, Atmospheric ozone and Antarctic climate, VI International Antarctic Conference, May 15–17, 2013, **Kiev**, Ukraine
----- преди 2013 -----
17. Kilifarska, Bakhmutov, Melnik, Geomagnetic field as a driver of Climate variability, XII Intern. Conf. on Geoinformatics: theoretical and applied aspects, 13-16 May 2013, **Kiev**, Ukraine
18. Kilifarska N.A., Ozone and ion chemistry of the lower stratosphere initiated by Galactic Cosmic Rays, “*From the stratosphere to the ionosphere workshop: coupling, boundary conditions and assumptions*”, **Paris**, 26-28 November 2012. <https://strattoionwork.sciencesconf.org/>
19. Kilifarska N.A., Climate variability - a Concert for O₃, H₂O Vapour and "Orchestra", 9th European Space Weather Week, 5-9 November 2012, **Brussels**, Belgium.
<http://www.stce.be/esww9/program/poster3A.php>
20. Kilifarska N.A., Bakhmutov V.G., Martazinova V.F., Melnyk G.V., Ivanova E.K., Geomagnetic field influence on the climatic parameters, Second Intern. Conference on “Актуальные проблемы электромагнитных зондирующих систем”, **Kiev**, Ukraine, 1-4 October, 2012.
21. Kilifarska N.A., Energy dependence of atmospheric ozone response to particles impact, Joint NordForsk/TOSCA workshop on “*Complexity and Climates*”, **Tromsø**, Norway, 27-30 March, 2012. http://complexityandplasmas.net/nordforsk/Nordforsk_TOSCA_files/Programme.pdf
22. Kilifarska N.A. Ozone as a mediator of galactic cosmic rays' impact on climate, Symposium on extraterrestrial Influence on climate, **Tokyo**, 31 Oct-4 Nov, 2011.
<https://sites.google.com/site/chimon6ryudows/english>
23. Kilifarska N.A. What we don't know about the Solar Influence on Climate? International Symposium on Recent Observations and Simulations of the Sun–Earth System II, **Borovets**, Bulgaria, September 11–16, 2011. http://www.isroses.lanl.gov/abstract_book.pdf
24. Kilifarska N.A. Uncertainties of our predictions for the future climate variations, Проблемы и достижения долгосрочного прогнозирования, **Kiev**, Ukraine, 5-8 October, 2011. (pdf)
25. Kilifarska N.A. Mechanisms of Solar Influence on the Earth Climate, Third Workshop: "Solar influences on the magnetosphere, ionosphere and atmosphere", **Sozopol**, Bulgaria, 6-10 June 2011.
<http://ws-sozopol.stil.bas.bg/>
26. Kilifarska N.A. Longitudinal sensitivity of the Ozone response to energetic particle precipitation, The 4thIAGA/ICMA/CAWSES-II TG4 Workshop on Vertical Coupling in the Atmosphere-Ionosphere System, Feb 14-Feb 18, 2011, **Prague**.
27. Kilifarska N.A. Y.K. Tassev Do we understand the the decadal variability of the ozone layer? 6th IAGA/ICMA/CAWSES Workshop on Long-Term Changes&Trends in the Atmosphere, June 15-18, 2010, **Boulder**, CO, USA.
28. Kilifarska N.A. Are the Sudden Stratospheric Warmings Related to Variability in the Solar Corpuscular and UV Radiation? *AGU Fall meeting*, **San Francisco**, California, 14-19 December, 2009.
29. Kilifarska N.A., Y.K. Tassev, Polar Stratospheric Warmings and their causality with Solar Proton Events, COSPAR– **Montreal**, 13-20 July, 2008.

30. Y.K. Tassev, **Kilifarska N.A.**, Influence of Solar Proton Events on the Middle Atmosphere Thermodynamics and Ozone, COSPAR– **Montreal**, 13-20 July, 2008.
31. Kilifarska N.A., Mechanisms of Solar Influences on the Polar Atmosphere, Fourth UN/ESA/NASA Workshop the International Heliophysical Year and Basic Space Sciences, **Sozopol**, June 2 - 6, 2008.
32. Kilifarska N.A., Y.K. Tassev, D. Tomova, Cosmic Ray Showers and their relation to the Stratospheric Sudden Warmings, Fourth UN/ESA/NASA Workshop the International Heliophysical Year and Basic Space Sciences, **Sozopol**, June 2 - 6, 2008.
33. Kilifarska N.A., Variability of Polar Atmosphere and its Effects on European Winter time Climatic Conditions, conference on Global Environmental Change: Challenges to Science and Society in South-eastern Europe, **Sofia**, May 19-21, 2008