O_3 as a driver of the North Atlantic Oscilation of Earth's climate

Tsvetelina Velichkova[1], Natalya Kilifarska[1]

[1] National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography, BAS, 3 "Acad. G.Bonchev", Sofia 1113, tsvelichkova@geophys.bas.bg, nkilifarska@geophys.bas.bg

Key words: North Atlantic Oscillation (NAO), lower stratospheric ozone and water vapour, surface temperature and pressure distance

Abstract
Recently many authors have suggested that regional climate changes are caused by the atmospheric climate modes, particularly the North Atlantic Oscillation (NAO). NAO is one of the most significant atmospheric modes because it has a great effect on the winter weather in Europe, Greenland, and northeastern part of North America, North Africa, and northern Asia. However, the factors determining the strength of NAO index and its long-term variations are still unknown. This article presents statistical evidence for lower stratospheric O_3 influence on the strength of NAO index, as well as one possible mechanism for its impact on the surface temperature and pressure in the regions of NAO action.

Озонът като фактор формиращ Северо-Атлантическата Осцилация на климата

Цветелина Величкова[1], Наталия Килифарска[1]

[1] Национален институт по геофизика, геодезия и география, Българска академия на науките, София 1113, България, tsvelichkova@geophys.bas.bg, nkilifarska@geophys.bas.bg

Ключови думи: Северо-Атлантическа Осцилация (NAO), ниско- стратосферен озон и водна пара, приземна температура

Резюме
В последно време много автори предполагат, че регионалните климатични изменения са причинени от атмосферните климатични моди, в частност Северо-Атлантическата Осцилация (NAO). NAO е една от най-значимите моди, защото има огромно влияние върху времето в Европа, Гренландия, североизточната част на Северна Америка, Северна Африка и Северна Азия през зимата. Въпреки това, факторите, определящи усилването на NAO индекса и неговите дългопериодични вариации са все още неизвестни. Това изследване представя статистически доказателства за влиянието на ниско-стратосферния озон (O_3) върху интензитета на NAO индекса, както и един възможен механизъм за неговия ефект върху приземните температура и налягане в регионите на действие на NAO.

Увод

Регионалните особености на климатичните промени не могат да бъдат обяснени нито с вариациите в слънчевата електромагнитна радиация, нито с увеличеното съдържание на парникови газове, вследствие индустриалната дейност на човешкото общество (т.нар. антропогенен фактор). Ефектът от промените в интензивността на слънчевото греене по своята природа е глобален, а дългата продължителност на живот на парниковите газове създава предпоставка за хомогенното им разпределение в земната атмосфера. Ето защо в последните години много автори смятат, че регионалните изменения в климата на Земята се дължат на влиянието на вътрешно-атмосферни цикли, повтарящи се през определени периоди. Някои от тях отиват и по-далече допускайки, че и глобалната изменчивост на климата се определя от взаимодействието между няколко такива цикли. Предполага се, че тези динамични колебания са предизвикани от фундаментални физични процеси като: нестабилност на климатологичния среден поток, мащабни взаимодействия между атмосферата и океаните и други (Wallace, 2000).

Една от регионалните вътрешно-атмосферни моди е Северноатлантическата осцилация (NAO). Тя се определя като разлика между наляганията измерени в субтропичния център на високо налягане над Азорските острови (или Лисабон, Португалия) и субполярния център на ниско налягане с център над Исландия (van Loon and Rogers, 1978; Rogers and van Loon, 1979; Meehl and van Loon,1979). Увеличаването на тази разлика води до усилването на западните ветрове духащи над Атлантика, които носят по-влажен въздух над Централна и Северна Европа (положителен NAO индекс). Съответно в такива години летата са хладни, а зимите меки и дъждовни и обратното – при слаби ветрове (отрицателен NAO индекс) имаме горещи лета и студени и сухи зими.

Независимо от огромното влияние на NAO върху метеорологичните условия през зимата (особено силно проявено в Атлантическия сектор и Европа) все още са неизвестни факторите движещи дълго-периодичните

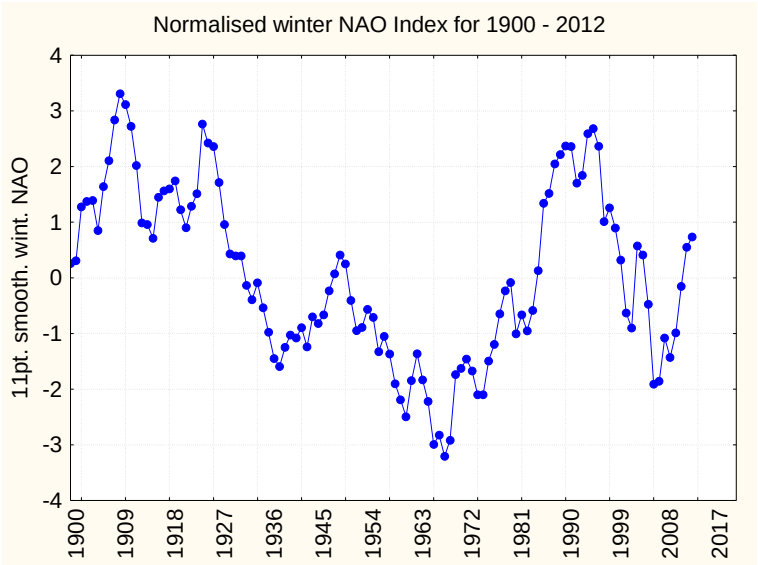
изменения на NAO индекса. Някои статистически изследвания съобщават за намерени връзки със слънчевата активност (Kodera, 2003; Georgieva et al., 2007). Други хипотези са свързани със стратосферно влияние, взаимодействие с океана или Атлантическия тропик (Battisti et all., 2001). С други думи, регионалните особености на климатичните промени не могат да бъдат обяснени с вътрешно-атмосферните моди, тъй като самите те могат да бъдат продукт на спецификата на измененията в климата.
От друга страна, в последно време бе установена зависимост между озона в ниската стратосфера и приземната температура (Килифарска, 2017). Неравномерното разпределение на озона в атмосферата и наличието както на дължинни и ширинни вариации, така и на асиметрия между двете полукълба, предполага потенциална свързаност с регионалните особености на измененията в климата. Настоящото изследване представя доказателства за съществуването на силна зависимост между вековите вариации на озона и NAO индекса, предлагайки механизъм за влияние на озона върху климата.

Данни и методи

Описаните резултати се основават на данни за относителното съдържание на O_3 на 70hPa, взети от реанализа ERA 20 century (ERA20C) за периода 1900-2010г. Данните за атмосферния индекс NAO– определян като разликата в баричното налягане над Азорските острови и Исландия взехме от Climatic Research Unit, University of East Anglia **(https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/nao/)** за зимните месеци, когато действието на NAO е най-силно. За статистическия анализ използвахме нормиран NAO индекс, т.е. сезонната разлика в налягането за всяка година, разделена на усреднената за 111 г. стойност на NAO.
За количествена оценка на степента на свързаност между озона в ниската стратосфера и NAO, използвахме корелационен анализ с отместване във времето, с цел установяването на евентуално забавяне в отговора на зависимата променлива. Корелационните карти на свързаността между параметрите бяха начертани само от статистически значими стойности на ниво 2σ (95%). Изследвани бяха двете хипотези: (1) независимата променлива е NAO и тя определя пространствено-времевите вариации на O_3 в ниската стратосфера; (2) независимата променлива е O_3, който и причина за появата на вътрешно-атмосферната мода NAO.

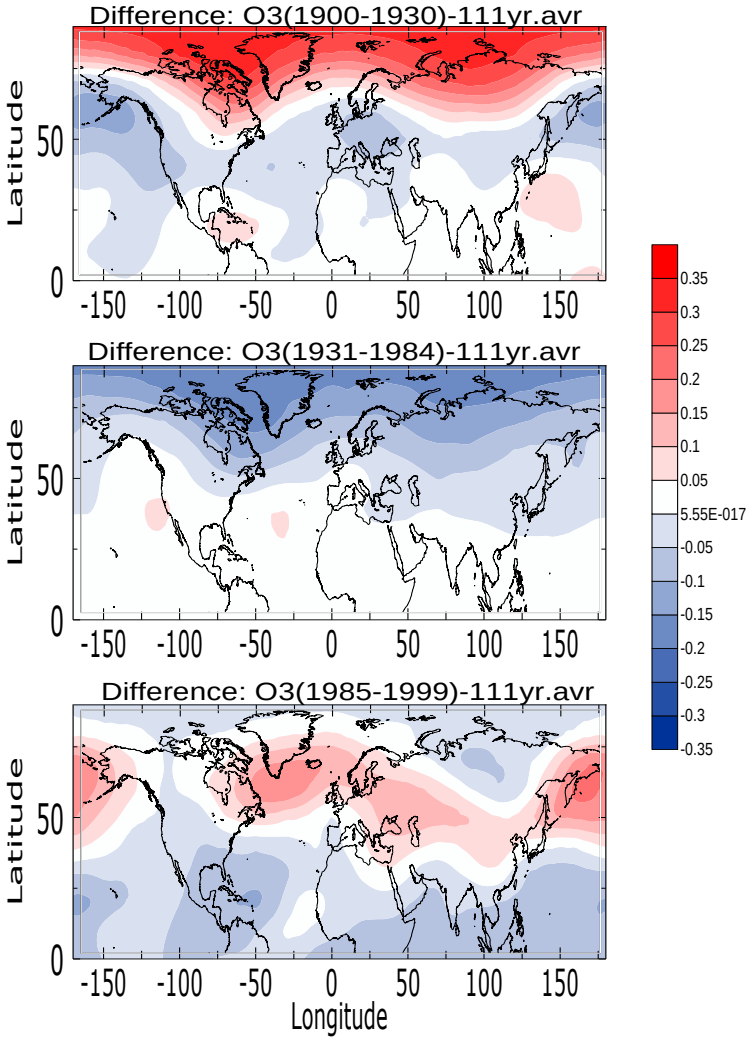
Резултати

Към настоящия момент голяма част от локалната изменчивост на климата се приписва на вътрешно-атмосферните моди – в частност на Северо-Атлантическата Осцилация NAO. От друга страна, механизмът на възникване на тази климатична вариация все още не е ясен. Това налага провеждането на допълнителни изследвания, които да помогнат изясняването на движещите фактори и механизма на възникване на NAO. Прегледът на еволюцията на зимния NAO индекс за периода 1900–2012 г. , представен на Фиг. 1, показва наличието на три периода с редуващи се положителни и отрицателни стойности. В периода 1900–1930 г. NAO се намира в положителна фаза, в 1931–1984 г. – той е в отрицателна, а в следващия период 1985–1999 г. отново е в своята положителна фаза на действие.



Фиг.1 Нормиран NAO индекс за зимните месеци за периода 1900-2012г.

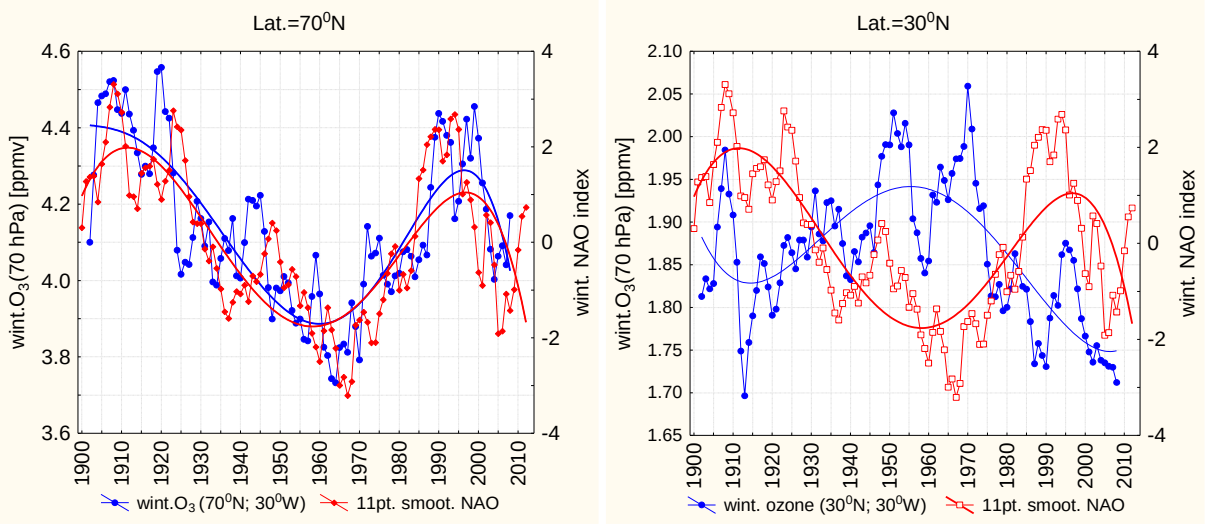
Освен това, много автори са установили повишената чувствителност на климата към вариациите на озона в ниската стратосфера (Wang et al., 1993; Hansen et al., 1997; Forster and Shine, 1997; Stuber et al., 2001; Aghedo et al., 2011). Това ни провокира да проверим съществува ли дълго-периодична вариация в пространственото разпределение на озона. Фиг. 2 представя пространственото разпределение на озона на 70 hPa за всеки от трите периода. Вижда се, че на високи ширини имаме ръст в количеството на озона за първия период, докато на средни ширини се наблюдава спад. Обратна е картината за втория период – имаме спад на озона на високи ширини, докато на средни ширини се наблюдава слабо повишение спрямо ситуацията в първия отрязък от време. В периода 1985-1999г. се забелязва връщане към първоначалното състояние на озона, наблюдавано през първия период.



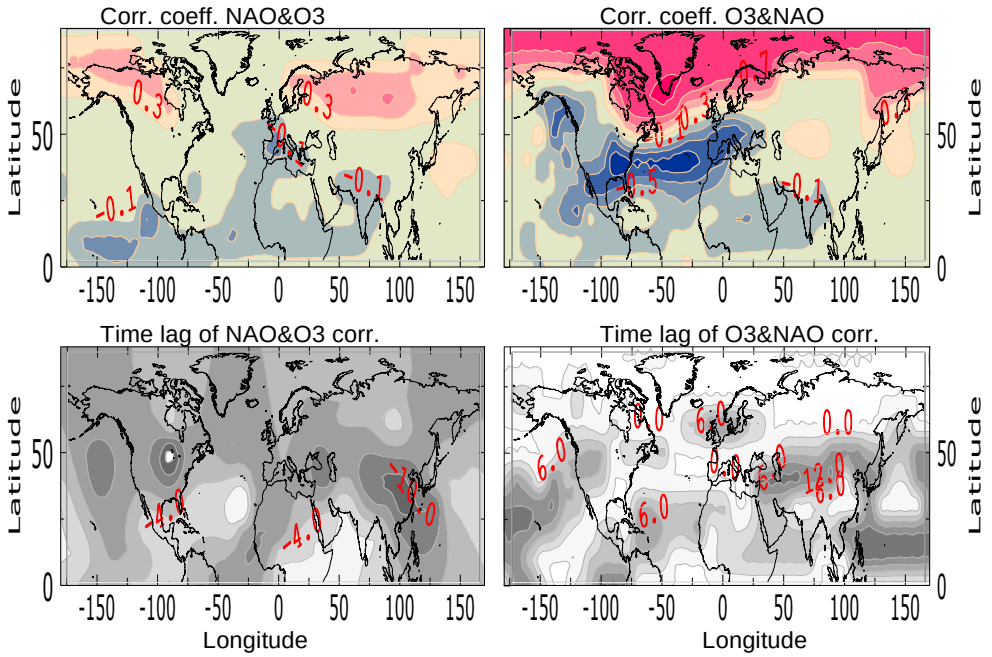
Фиг.2 Пространствено разпределение на отклонението на зимния O_3 на 70hPa от 111-годишното му климатично средно, определено за зимния период от годината.

Тази цикличност в пространственото разпределение на озона в ниската стратосфера ни дава основание да предположим съществуването на връзка с дългопериодичните изменения на NAO индекса. Сравнението на времевите редове на озона в две точки с приблизителните координати на Исландия (70^0с.ш; 30^0з.д.) и Азорските острови (30^0с.ш.; 30^0з.д.) – с индекса NAO за периода 1900-2010г., показва тяхната синхронна вариация на полярни ширини и вариация в противофаза на тропични ширини (виж Фиг. 3).

Количествена оценка на евентуалната свързаност между две променливи може да ни даде статистическия метод корелационен анализ. Бе избран неговият вариант с отместване назад във времето на независимата променлива. Оценихме последователно влиянието на NAO индекса върху озона и обратно – влиянието на O_3 върху NAO индекса. Корелационните коефициенти (изчислени във всяка точка от изследваната мрежа със стъпка 10^0 по ширина и дължина) бяха умножени с автокорелационната функция на NAO, което намалява теглото на корелациите с голямо отместване във времето (Kenny, 1979). Корелационните карти, базирани само на статистически значимите на ниво 2σ коефициенти, са представени на Фиг. 4.



Фиг. 3 Сравнение на вековите вариации на озона на 70 hPa – съответно на 70⁰ с.ш. и 30⁰ с.ш., в дължинния сектор на Азорските о-ви и Исландия – с атмосферния индекс NAO за периода 1900-2010г. Забележително е синфазното им изменение във времето на високи ширини и противофазната им вариация на ниски ширини.



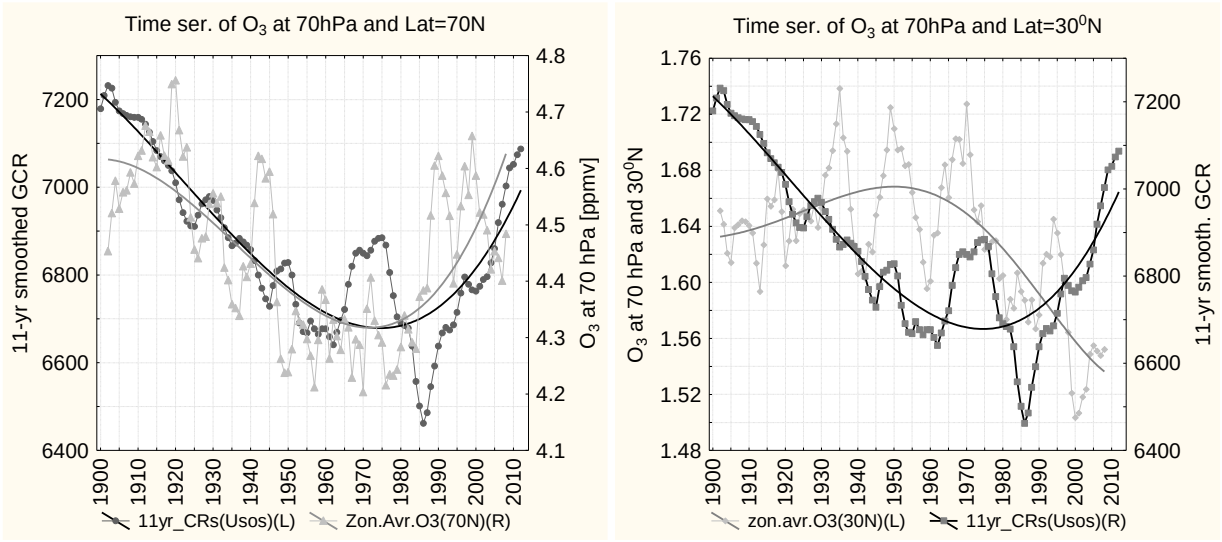
Фиг. 4 Корелационни карти на свързаността между озона на 70hPa NAO индекса през зимата, изчислени за периода 1900-2010г.

Фиг. 4 показва ясно, че предполагаемото влияние на NAO върху O_3 е слабо изразено, което се вижда както от ниските корелационни коефициенти, така и от голямото закъснение, с което озона реагира на предполагаемото въздействие на NAO (Фиг. 4, ляв панел). Обратно, когато за независима променлива е избран озонът, ясно се открояват два центъра на действие. Първият е в региона на Гренландия и Исландия, където се наблюдават високи положителни корелации между двете променливи. Това показва, че нарастването на концентрацията на озон на суб-полярни ширини води по повишение на стойността на NAO индекса. В съответствие с дефиницията на Hurrell (1995) и Jones *et al.* (1997) това означава локално намаляване на налягането в северната част на Атлантическия океан. Обратно, намаляването на плътността на озона води до понижение на NAO индекса, което е еквивалентно на ръст на налягането над Исландия и Гренландия.

Вторият център на действие е в близост до Азорите, като корелацията там е отрицателна, тоест нарастването на концентрацията на O_3 води до понижение на NAO индекса и обратно – занижените стойности на озона са съпроводени с високи стойности на NAO (сравни с Фиг. 3). Силната свързаност между озона и NAO индекса, както и моменталната реакция на NAO (без задръжка във времето) ни дава основание да заключим, че форсингът (т.е. въздействащият фактор) в Атлантическия регион е озонът в ниската стратосфера.

Този резултат поражда два въпроса: (1.) Кои са факторите определящи вариациите в пространственото разпределение на O_3 в ниската стратосфера? и (2.) Какъв е механизмът на влияние на озона върху приземната температура и налягане? По първия въпрос – до неотдавна се предполагаше, че основният фактор определящ изменчивостта на озона в ниската стратосфера е глобалната стратосферна циркулация, известна като циркулация на Brue-Dobson. Обаче, числените експерименти с различни климатични модели (Grewe, 2006) показват, че само ~ 30% от изменчивостта на озона в ниската стратосфера се дължи на пренос от екваториални ширини, където става фотохимично образуване на озон във високата стратосфера. Още по-новите изследвания показват, че галактическите космически лъчи, проникващи в ниската стратосфера са в състояние – при определени условия (т.е. високо съдържание на ниско-енергетични електрони и суха атмосфера) – да образуват озон (Kilifarska, 2013; 2017).

За проверка на тази хипотеза бяха сравнени времевите редове на озона и NAO индекса като резултатите са представени на Фиг. 5. Анализът на фигурата показва добра синхронизация между изменението на галактическите космически лъчи (ГКЛ) и озона на 70 hPa във високи ширини. На тропика тази връзка е по-слабо изразена и е с обратен знак.



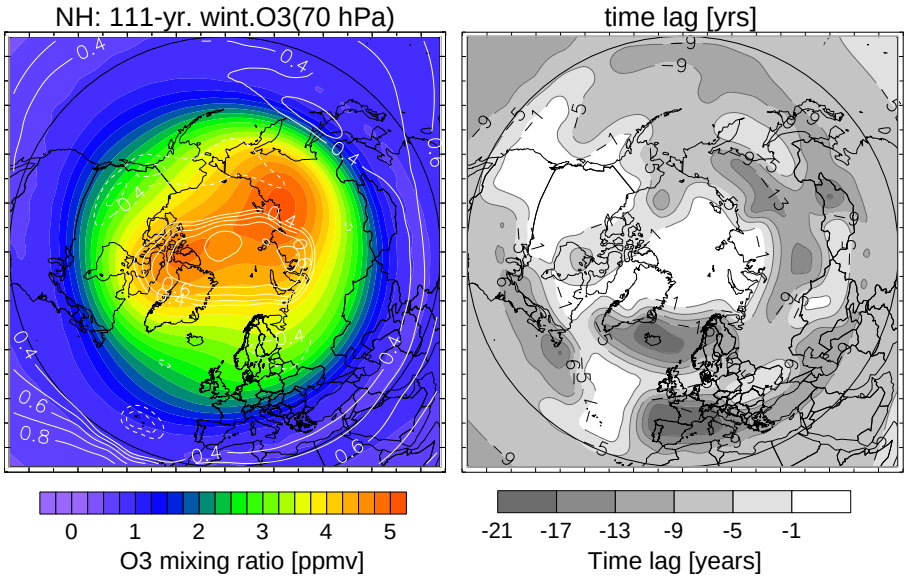
Фиг. 5 Сравнение на времевите изменения на озона в ниската стратосфера (на 70 hPa) и NAO индекса. Левият панел показва сравнението на 70º с.ш., а десния – на 30º с.ш..

Количествена оценка за свързаността между ГКЛ и озона на 70 hPa ни дава корелационният анализ. От корелационната карта, представена на Фиг. 6 се вижда, че степента на свързаност между ГКЛ и озона е неравномерно разпределена в пространството. Така например, на високи ширини се наблюдава синхронизирана изменчивост, с високи корелационни коефициенти, без задръжка във времето (сравни левия и десния панел на Фиг. 6). Това предполага непосредствено влияние на ГКЛ върху озона. На средни ширини ковариацията е в противофаза, с по-малки корелационни коефициенти и то само в определени дължинни сектори (Фиг. 6). При това в района на Азорските острови, западна Канада и Алеутските острови озона реагира без забавяне във времето.

Анализът на фиг. 6 ни дава основание да заключим, че дълго-периодичните вариации на озона в ниската стратосфера са повлияни силно от вековите вариации на ГКЛ. Освен това, фиг. 3 и 4 показват, че вариациите на озона са съпътствани от изменения в атмосферния индекс NAO. Така например, продължителното намаление на интензитета на ГКЛ и плътността на O_3 на високи ширини (до към средата на 80-те години) води до постепенното понижение на NAO индекса, така че между 1931 и 1984 той става отрицателен (виж фиг. 3). В средата на 80-те години се наблюдава обръщане на тренда на ГКЛ, след което и озона, и NAO започват да нарастват. Тази синхронизация във времевите изменения поражда естествения въпрос за механизма на влияние на O_3 върху приземните температурата и налягане.

Един възможен механизъм е свързан с влиянието на озона върху температурата на тропопаузата и респективно върху стабилността на въздушните маси във високата тропосфера (Kilifarska, 2012; 2015). Така например, охлаждането на тропопаузата води до дестабилизация на въздушните маси (Young et al., 2003; North and Eruhimova, 2009) и износ на водна пара във височина. Увеличената влажност усилва парниковия ефект, тъй като 90% от него се дължи на водната пара във високата тропосфера (Inamdar et al., 2004), а затоплянето на приземния въздух рефлектира в повишаване на налягането p (в съответствие със закона за

идеалния газ: $p=\rho.R.T$; ρ и R= 8.3144598(48) $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ са съответно плътността на въздушната маса и газовата константа).



Фиг. 6. Корелационна карта на свързаността между галактическите космически лъчи и озона на 70 hPa – непрекъснатите линии означават положителна, а пунктирните – отрицателна корелация. За сравнение е показана климатичната карта на озона за периода 1900-2010г.

Съобразно този механизъм, понижението на озона в ниската стратосфера на полярни ширини до края на 60-те години (Фиг.3) води до охлаждането на тропопаузата и създаване на условия за вертикален износ на водна пара във височина. Това усилва парниковия ефект, затопля приземната атмосфера и води до нарастване на приземното налягането в Исландия и Гренландия. От друга страна, максимума на O_3 в областта на Азорските острови води до затопляне на тропопаузата и стабилизиране на високата тропосфера. Това намалява притока на водна пара и води до постепенното изсушаване на високата тропосфера. В резултат се наблюдава отслабване на парниковия ефект, охлаждане на приземния въздух и намаляване на приземното налягане в района на Азорските острови. Следователно, силното понижение на индекса NAO в периода 1931-1984, се обяснява много добре с модулирането на озона в ниската стратосфера от ГКЛ. При това ефектът от въздействието на ГКЛ е неравномерно разпределен в пространството (Божилова, Килифарска, 2018), което обяснява и регионалните особености в отговора на климатичната система .

Заключение

През последните две десетилетия стана ясно, че измененията в климата са с различна амплитуда и дори с различен знак в различните региони на планетата. Този факт предизвика взрив от опити да се обясни тази особеност на климатичните промени, но преобладаващата част от тях се свеждат до влиянието на регионалните климатични моди, които внасят нерегулярност в нашите представи за глобалното затопляне. За жалост този тип обяснения не ни помагат да разберем физическата природа на този феномен, тъй като самите климатични моди вероятно са продукт на регионалната специфика на климатичните промени. Това налага изследването на реалните фактори допринасящи за нехомогенното изменение на климата.
Една от климатичните моди с определено силно влияние върху метеорологичните параметри в Атлантическия сектор, Централна и Северна Европа (особено през зимата) е Северно-Атлантическата Осцилация (NAO). Статистическият анализ на пространственото разпределение на озона в ниската стратосфера и вековите вариации на индекса NAO (за периода 1900-2010 г.) показа, че пространствено-времевите изменения на озона са най-вероятния двигател на дълго-периодичните изменения на NAO. Работата представя един възможен механизъм за влиянието на озона върху приземната температура и налягане както и причините за неравномерното разпределение на озона в ниската стратосфера.

Благодарности:

Настоящото изследване е осъществено с частично финансиране от Фонд Научни изследвания, ДН 14/1 от 11.12.2017. Special thanks to the World Federation of Scientists, Switzerland, which has granted the vast majority of the funding.
The authors are thankful to the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts for provided data from ERA20C reanalysis, as well as to the Climatic Research Unit, University of East Anglia, UK for the provided NAO data.

ЛИТЕРАТУРА

Aghedo, A.M., Bowman, K.W., Worden, H.M., Kulawik, S.S., Shindell, D.T., Lamarque, J.F., Faluvegi, G., Parrington, M., Jones, D.B.A., Rast, S., 2011, The vertical distribution of ozone instantaneous radiative forcing from satellite and chemistry climate models, J. Geophys. Res., 116, D01305, doi:10.1029/2010JD014243.

Божилова, Р.Ц., Килифарска, Н.А. Геомагнитно фокусиране на Космичните Лъчи измерени при земята - доказателства и механизми (настоящия сборник).

D. Battisti, P. Chang, A. Czaja, R. Dickson, J. Hurrell, M. Mccartney, R. Saravanan, M. Visbeck, 2001, North Atlantic climate variability: phenomena, impacts and mechanisms, Int. J. Climatol. 21: 1863–1898.

Forster, P.M. de F, Shine, K., 1997. Radiative forcing and temperature trends from stratospheric ozone changes, J. Geophys. Res., 102(D9), 10841.

Georgieva, K., Kirov, B., Tonev, P., Guineva, V., Atanasov, D., 2007. Long-term variations in the correlation between NAO and solar activity: The importance of north–south solar activity asymmetry for atmospheric circulation. Advances in Space Research 40, 1152–1166. https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.02.091

Grewe, V., 2006. The origin of ozone, Atmos. Chem. Phys., 6, 1495-1511, doi:10.5194/acp-6-1495-2006.

Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., 1997, Radiative forcing and climate response, J. Geophys. Res., 102, 6831–6864.

Hurrell, J.W., 1995, Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperature and precipitation, Science 269, 676–679.

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.

Jones, P.D., Jonsson, T., Wheeler, D. 1997, Extension to the North Atlantic oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and south-west Iceland. International Journal of Climatology 17, 1433–1450.

Kenny, D.A., 1979, Correlation and causality, John Wiley & Sons Inc, New York.

Килифарска, Н.А., 2017, Механизъм за връзка между космическите лъчи, геомагнитното поле и климата на земята, Дисертация за присъждане на степен Доктор на физическите науки, София, България.

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., 2012, Mechanism of lower stratospheric ozone influence on climate, Int. Rev. Phys, 6 (3), 279-290.

Kilifarska, N.A., 2015, Bi-decadal solar influence on climate, mediated by near tropopause ozone, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2015.08.005i

Kilifarska, N.A., 2017(a), 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.

Kodera K., 2003, Solar influence on the spatial structure of the NAO during the winter 1900–1999, Geophys.Res.Lett., 30(4), 1175, doi:10.1029/2002GL016584.

Marshal J., Y. KUSHNIR

Meehl,G. A., van Loon, H., 1979, The seesaw in winter temperatures between Greenland and Northern Europe. PartIII:Teleconnections with bower latitudes, Mow.Wea.Rev.,107,1095-1106.

North, G.R., Eruhimova, T.L., 2009. Atmospheric thermodynamics: elementary physics and chemistry, Cambridge University Press.

Rogers, J. C., van Loon, H., 1979, The seesaw in winter temperatures between Greenland and Northern Europe. PartII: Some oceanic and atmospheric effects in middle and high latitudes.,Mon. Wea. Rev.,107,509-519.

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.

van Loon, H., Rogers, J. C., 1978, The seesaw in winter temperatures between Greenland and Northern Europe. PartI:General description,Mon. Wea. Rev.,106,296-310.

Wallace, J.M., 2000, North Atlantic Oscillation/annular mode: Two paradigms– one phenomenon, Q.

J. R. Meteorol. Soc., 126, 791–805.

Wang, W-Ch., Zhuang, Y-Ch., Bojkov, R., 1993. Climate implications of observed changes in ozone vertical distributions at middle and high latitudes of the Northern Hemisphere, Geophys. Res. Lett. 20(15), 1567-1570.

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.