

Связь изменений климата с геомагнитным полем. 3. Северное и Южное полушария

© Н.А. Килифарска¹, В.Г. Бахмутов², Г.В. Мельник², 2016

¹Национальный институт геофизики, геодезии и географии,
Болгарская академия наук, София, Болгария

²Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 16 июля 2015 г.

Представлено членом редколлегии Я.М. Хазаном

Показано відмінності розглянутих раніше зв'язків між геомагнітним полем і кліматом для Північної і Південної півкуль. Вони пов'язані насамперед з глибиною проникнення в атмосферу Землі заряджених частинок, модульованих геомагнітним полем і їх впливом на баланс озону поблизу тропопаузи. Формування озону в нижній стратосфері відбувається у Північній півкулі в іонно-молекулярному автокаталітичному циклі його утворення, ініційованому галактичними космічними променями, у Південній — внаслідок ефекту "самовідновлення", ініційованого сонячними енергійними частинками. Пояснено спостережуване одночасне потепління в Західній Антарктиці і похолодання — в Центральній і Східній.

Ключові слова: геомагнітне поле, клімат, механізм зв'язку.

Введение. В первой части статьи представлен краткий обзор гипотез о возможных механизмах солнечно-земных связей и передачи энергии в цепочке Солнце—магнитосфера—ионосфера—верхняя атмосфера Земли [Бахмутов и др., 2014]. Во второй части статьи предложен механизм, который демонстрирует причинно-следственную цепочку взаимодействий между различными атмосферными параметрами и геомагнитным полем [Килифарска и др., 2015]. Показано, что в Северном полушарии (в широтном поясе 40—70° с. ш.) регионы с устойчиво низкими зимними температурами и высоким давлением хорошо совпадают с областями повышенной напряженности геомагнитного поля, и наоборот. Обнаружено также совпадение положения минимумов и максимумов интегральных характеристик полей модуля полного вектора напряженности магнитного поля, температуры и давления, содержания озона и удельной влажности на уровне верхней тропосферы—нижней стратосферы (UTLS) за вторую половину XX в. в Северном полушарии. Нами был предложен механизм, который объясняет, каким образом магнитное поле Земли может влиять на пространственное распределение и ва-

риации приземной температуры воздуха [Kili-farska, 2012a, б; Килифарска и др., 2015].

Возникает вопрос: подходит ли такой механизм для объяснения процессов в Южном полушарии, где иное соотношение суша—океан, другая атмосферная циркуляция и где, по общепринятому мнению, протекают глобальные процессы, формирующие климат нашей планеты.

Мы решили выяснить, есть ли какая-либо связь между пространственно-временной структурой геомагнитного поля и распределением температур — охлаждением в Восточной Антарктике наряду с экстремальным потеплением в Западной на протяжении нескольких последних десятилетий. Для этого, по аналогии с Северным полушарием [Килифарска и др., 2015], проанализированы данные реанализа ERA-40 и ERA Interim по приземной температуре воздуха T_{2m} (на высоте 2 м над земной поверхностью), по содержанию озона на уровне 70 гПа и удельной влажности на уровне 150 гПа (были использованы сезонные данные для зимних месяцев, если не указано другое), а также выполнен расчет модуля полного вектора напряженности геомагнитного поля F (нТл) и его вековых вариаций по коэффициентам IGRF (International Geo-

magnetic Reference Field, <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#igrfgrid>) для Южного полушария в поясе средних—высоких широт. Анализ потоков галактических космических лучей (ГКЛ) и солнечных протонов проведен по данным соответственно нейтронного монитора Climaх и спутников GOES. Корреляционный анализ выполнялся с использованием пакета STATISTICA 6.0.

I. Геомагнитное поле и температура в Антарктике

Характерная черта современного климата многих регионов нашей планеты — повышение температуры воздуха в нижней тропосфере, сопровождающееся изменением циркуляции атмосферы. Наиболее интенсивное потепление в Южном полушарии отмечено во второй половине XX в. на станциях Антарктического полуострова, что согласуется с планетарными тенденциями, но происходит на фоне незначительных изменений в континентальной Антарктиде.

Разные тенденции в изменении климата Антарктики являются предметом непрерывных научных дебатов. Одновременное потепление в Западной Антарктиде и охлаждение в ее центральной и восточной частях обуславливает вопрос о факторах и механизмах, ведущих к таким изменениям. Большинство исследователей объясняют тенденцию зимне-весеннего потепления на Антарктическом полуострове усилением западной циркуляции и распространением теплых и влажных воздушных масс Тихого океана [Thompson, Solomon, 2002; Kwok, Comiso, 2002; Schneider et al., 2006]. Кроме того, Антарктический циркумполярный вихрь препятствует распространению холодного полярного воздуха, обеспечивая тем самым охлаждение над центральной частью континента. Согласно работе [Steig et al., 2009], не только на Антарктическом полуострове, но и во всей Западной Антарктике в течение последних 50 лет происходит потепление. Например, на станции Академик Вернадский (65° 15' ю. ш.; 64° 15' з. д.) среднегодовая температура возросла на 2,5 °C [Мартазинова и др., 2010].

Положительную тенденцию в изменениях приземной температуры воздуха приписывают региональным изменениям атмосферной циркуляции. Однако реконструкция приземной температуры воздуха за последние 150 лет указывает на постепенное потепление Антарктического континента [Schneider et al., 2006]. Отсюда следует, что усиление западной циркуляции

с конца 1950-х годов, возможно, является дополнительной, но не основной причиной потепления в Западной Антарктике при охлаждении центральной части континента.

Поскольку исследуется связь геомагнитного поля с некоторыми климатическими параметрами, напомним, что соотношение между ними на длинных (столетних) временных шкалах отмечали многие авторы (см., например, [King, 1974; Vieira et al., 2008; Бахмутов и др., 2011]).

По аналогии с Северным полушарием [Килифарска и др., 2015], выполним расчеты и анализ для средних широт Южного полушария. На рис. 1 представлены интегральные характеристики модуля полного вектора геомагнитного поля (F), его вековой вариации (F_{SV}) и температуры воздуха (T_{2m}) в широтном поясе 60—80° ю. ш. за период 1957—2012 гг. Очевидно, что картина отличается от данных по Северному полушарию (см. рис. 2 в работе [Килифарска и др., 2015]). Отметим также, что в Антарктике T_{2m} лучше антикоррелирует с F_{SV} (коэффициент корреляции 0,92, фазовый сдвиг – 40°), чем с F (коэффициент корреляции 0,76, фазовый сдвиг – 70°), тогда как в Северном полушарии напротив, лучше выражена корреляция между температурой T_{2m} и F [Бахмутов и др., 2011, 2014]. Это значит, что в Южном полушарии области изменения температуры приурочены к областям наибольшего изменения геомагнитного поля — фокусам векового хода, тогда как в Северном полушарии они соответствуют положению мировых магнитных аномалий.

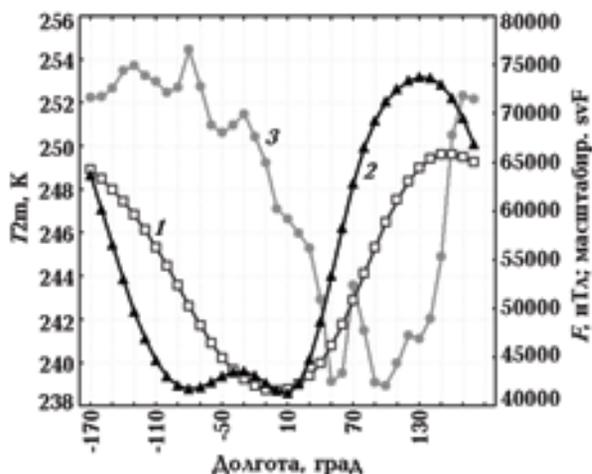


Рис. 1. Интегральные характеристики модуля полного вектора геомагнитного поля F (1), его вековой вариации F_{SV} (2), приведенной к масштабу F , и приземной температуры воздуха T_{2m} (3) в широтном поясе 60—80° ю. ш. за период 1957—2012 гг.

Для оценки пространственного распределения связи между F_{SV} и T_{2m} , на рис. 2 представлены статистически значимые (на уровне 95%) коэффициенты корреляции за период 1957—2012 гг. на фоне среднего распределения приповерхностной температуры воздуха T_{2m} . Время задержки между изменением магнитного поля и температуры не более 2 лет. Синхронность F_{SV} и T_{2m} в Западной Антарктиде, где наблюдается рост среднегодовой температуры за последние 55 лет, очевидна. Это можно видеть и на рис. 3, где показаны временной ряд T_{2m} и вековая вариация на 70° ю. ш. для трех различных долгот, охватывающих Западную Антарктику. В то же время в Восточной Антарктиде эти параметры не связаны (см. рис. 2).

Для объяснения таких закономерностей необходимо предложить механизм, посредством которого геомагнитное поле может оказывать влияние на приповерхностную температуру воздуха. В основе такового для Северного полушария [Kilifarska, 2012б; Килифарска и др., 2015] лежит цепочка причинно-следственных связей между содержанием озона и удельной влажностью (водяным паром) в нижней стратосфере и приземной температурой воздуха. Вариации плотности озона вблизи тропопаузы влияют на температуру в области UTLS. Чем выше здесь температура, тем выше влажноадиабатический градиент и тем более "сухим" становится этот слой (уменьшается его удельная влажность). И наоборот, охлаждение области UTLS позволяет водяному пару легче распространять-

ся вверх. Эти небольшие колебания влажности в области UTLS в зимний период через отраженное длинноволновое излучение Земли влияют на радиационный баланс планеты и, как следствие, на приземную температуру воздуха.

Для проверки предположения о связи геомагнитного поля, ГКЛ и TOZ в Южном полушарии проведен кросс-корреляционный анализ этих параметров по всей Земле за период 1957—2012 гг. и рассчитаны статистически значимые (на уровне 95%) коэффициенты корреляции для каждого узла сетки с шагом 10° по широте и долготе. На рис. 4, а, б (с. 55) представлены результаты для Северного полушария, на рис. 4, в, г — для Южного. При этом следует подчеркнуть, что в Северном полушарии для широтного пояса $40\text{--}70^\circ$ с. ш. имеется наиболее густая сеть мониторинговых наблюдений, в то время как для Южного полушария данных существенно меньше, что снижает репрезентативность результатов.

Для Северного полушария (см. рис. 4, а) положительные коэффициенты корреляции между ГКЛ (по данным нейтронного монитора Climax) и TOZ в основном совпадают с областями с положительной корреляцией между геомагнитным полем и ГКЛ.

В Южном полушарии, однако, влияние геомагнитного поля на содержание озона в нижней стратосфере через контроль над ГКЛ, по видимому, отсутствует, поскольку не наблюдается соответствия между картами коэффициентов корреляции ГКЛ и TOZ (на широтах $40\text{--}50^\circ$ ю. ш. корреляция отрицательная) и геомагнитным полем — ГКЛ (см. рис. 4, в). Исключение — Антарктический континент, где увеличение/уменьшение потоков ГКЛ сопровождается повышением/истощением TOZ. Этот результат требует, вероятно, иного механизма, посредством которого геомагнитное поле может оказывать влияние на климат. Ниже остановимся на этом вопросе детально и в первую очередь проследим, есть ли связь между вариациями содержания озона и изменениями приповерхностной температуры воздуха в Южном полушарии.

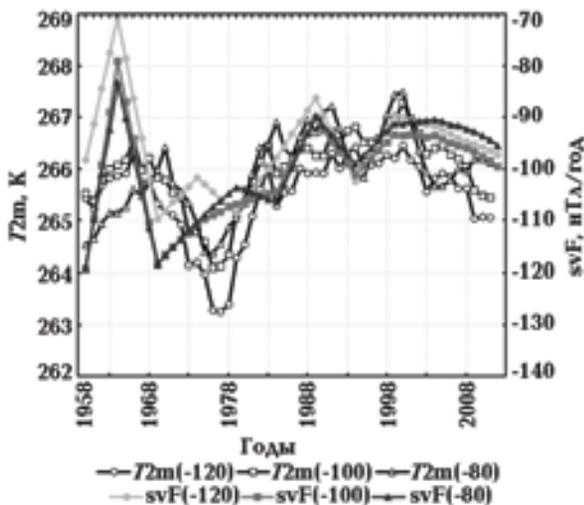


Рис. 3. Вековая вариация геомагнитного поля F_{SV} и приземная температура воздуха T_{2m} на 70° ю. ш. для трех различных долгот Западной Антарктики за период 1957—2012 гг.

II. Атмосферный озон и приповерхностная температура воздуха в Южном полушарии

В работе [Килифарска и др., 2015] показано, что общее содержание озона в Северном полушарии антикоррелирует с приповерхностной температурой воздуха. Такая же антикорреля-

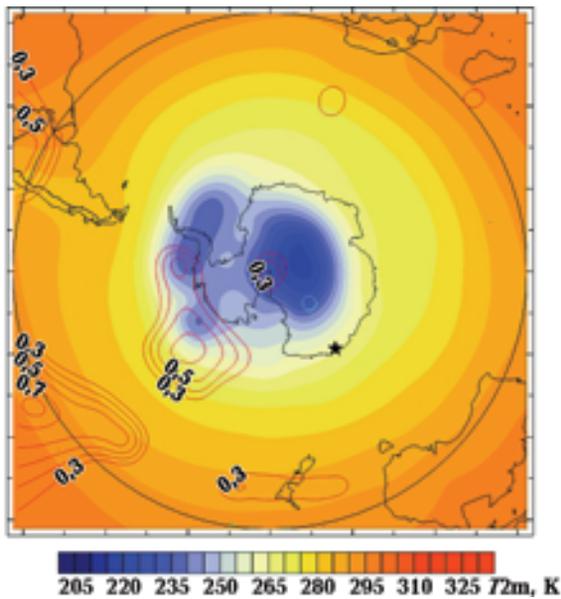


Рис. 2. Карта пространственного распределения почти "мгновенных" (интервал задержки ≤ 2 года) коэффициентов корреляции между F_{sv} и температурой T_{2m} за период 1957—2012 гг. на фоне среднего распределения зимней температуры T_{2m} (цветовой фон); красными контурами выделены положительные коэффициенты корреляции, синими — отрицательные, значения ниже 0,3 не приведены. Обращает внимание синхронизация вариаций геомагнитного поля и температуры вблизи Западной Антарктики. Здесь и далее звездочкой обозначено среднее для последних 50 лет положение магнитных полюсов в Южном и Северном полушариях.

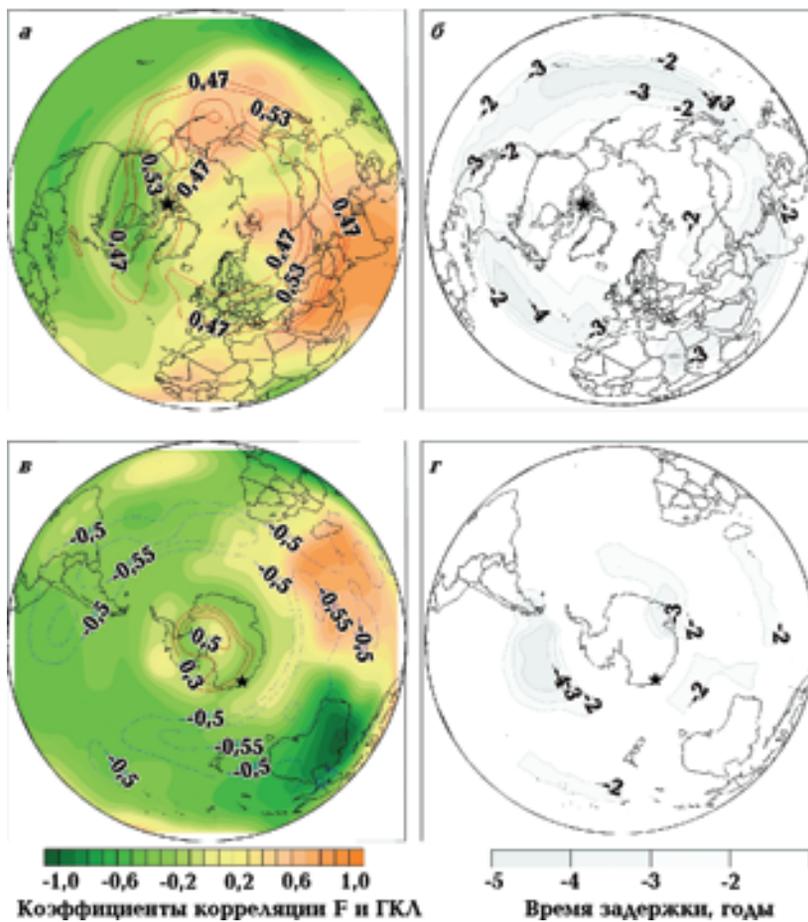


Рис. 4. Карта статистически значимых коэффициентов корреляции между ГКЛ и общим содержанием озона ТОЗ (контур), данные усреднены за период 1957—2012 гг.: а, в — коэффициенты корреляции между геомагнитным полем и ГКЛ, б, г — время отклика ТОЗ на воздействие ГКЛ, в годах. Красными контурами показаны положительные коэффициенты корреляции, синими — отрицательные. Обращает внимание положительное воздействие ГКЛ на содержание озона в Северном полушарии (наряду с соответствием областей с положительной корреляцией между геомагнитным полем и ГКЛ), в то время как в Южном полушарии связь отрицательная.

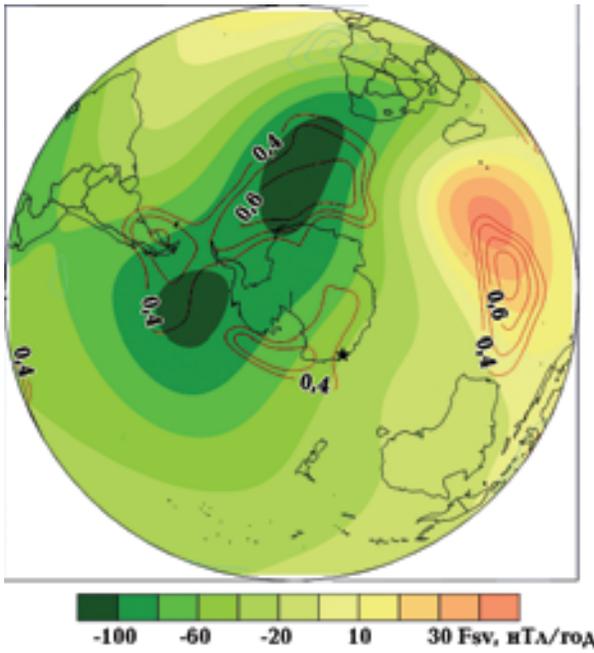


Рис. 8. Карта пространственного распределения коэффициентов корреляции (статистически достоверных на уровне 2σ) между вековой вариацией геомагнитного поля и TOZ за период 1957—2012 гг. (интервал задержки ≤ 2 года) при сопоставлении с пространственным распределением вековой вариации геомагнитного поля (цветовой фон); красные контуры соответствуют положительной, синие — отрицательной корреляции.

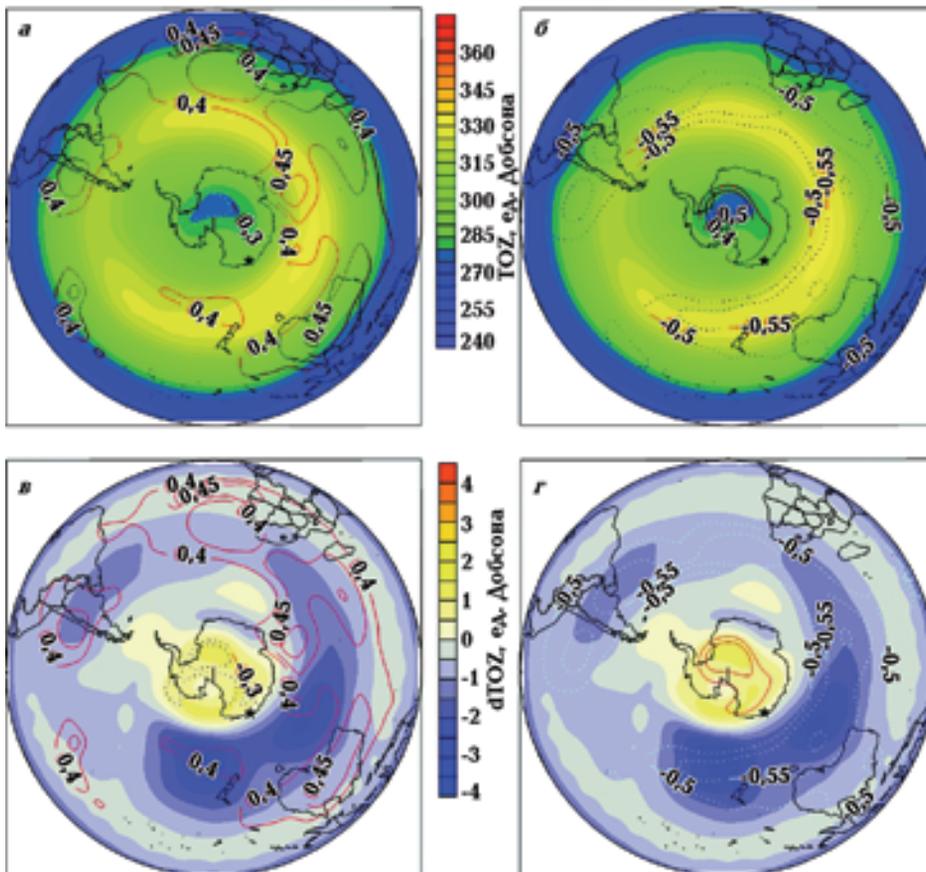


Рис. 9. Карта пространственного распределения статистически значимых (на уровне 95 %) коэффициентов корреляции между TOZ и СП (а, в) и TOZ и ГКЛ (б, г) при сопоставлении с TOZ за период 1957—2012 гг. (цветовой фон на а и б) и его аномальными значениями, рассчитанными как отклонение от средних 10-летних значений (цветовой фон на в и г). Красные контуры соответствуют положительной, синие — отрицательной корреляции. Интервал задержки реакции озона на воздействие энергичных частиц ≤ 2 года.

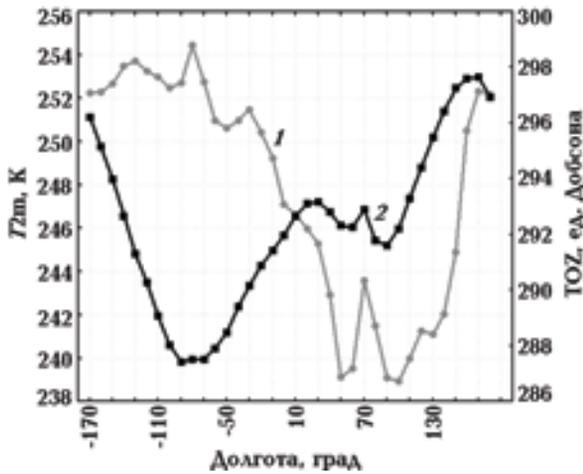


Рис. 5. Усредненное за период 1957—2012 гг. распределение приповерхностной температуры T_{2m} (1) и общего содержания озона TOZ (2) для диапазона широт 60° — 90° ю. ш.

ция наблюдается при сопоставлении F с T_{2m} . Для Южного полушария на рис. 5 представлено сравнение долготного распределения TOZ и T_{2m} за период 1957—2012 гг. Выше отмечено (см. рис. 1), что в Антарктике T_{2m} лучше антикоррелирует с F_{SV} , чем с F . Отметим также

более высокий коэффициент корреляции между F_{SV} и TOZ (0,75 без сдвига по фазе). Это может свидетельствовать в пользу содержания озона как важного звена в цепочке причинно-следственных связей и для Южного полушария.

Чувствительность климата к изменению концентрации озона вблизи тропопаузы обсуждается на протяжении длительного времени [Ramanatan et al., 1976; Wang et al., 1980, 1993; Wirth, 1993; Forster, Shine, 1997; Stuber et al., 2001]. Тем не менее, ввиду взаимной компенсации влияния содержания стратосферного и тропосферного озона [Forster, Shine, 1997; Climate ..., 2007], в настоящее время считается, что суммарное воздействие озона на радиационный баланс Земли относительно невелико.

Для проверки наличия связи между среднегодовыми значениями TOZ и T_{2m} проведен кросс-корреляционный анализ в каждом узле сетки с шагом 10° по широте и долготе. Карта статистически значимых коэффициентов корреляции (с задержкой отклика T_{2m} не более 2 лет) показана на рис. 6, где также вынесено среднее распределение TOZ за 55-летний временной интервал. Обращают на себя внимание положительная корреляция между T_{2m} и TOZ вблизи Западной Антарктики (вблизи 50-х граду-

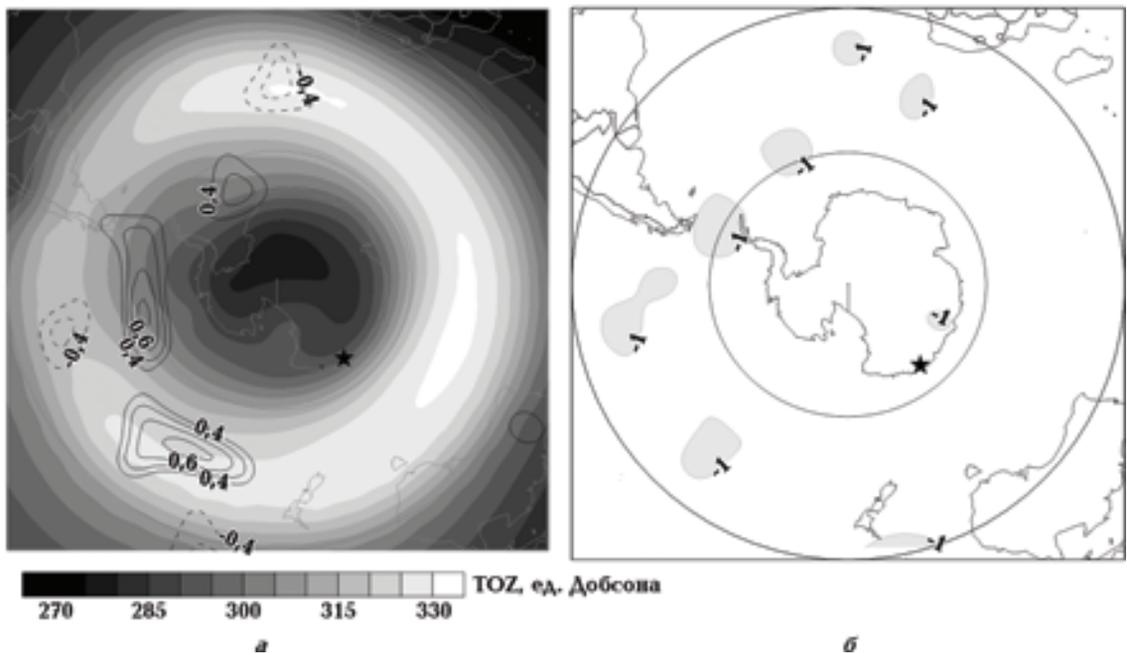


Рис. 6. Карта пространственного распределения коэффициентов корреляции между TOZ и T_{2m} за период 1957—2012 гг. и среднее за 55 лет распределение TOZ (серый фон) в Южном полушарии (а); непрерывные контуры соответствуют положительным, штриховые — отрицательным коэффициентам корреляции (значения ниже 0,3 не приведены). Обращает внимание синхронная изменчивость обоих параметров вблизи Западной Антарктики. Время запаздывания реакции температуры на воздействия озона (б).

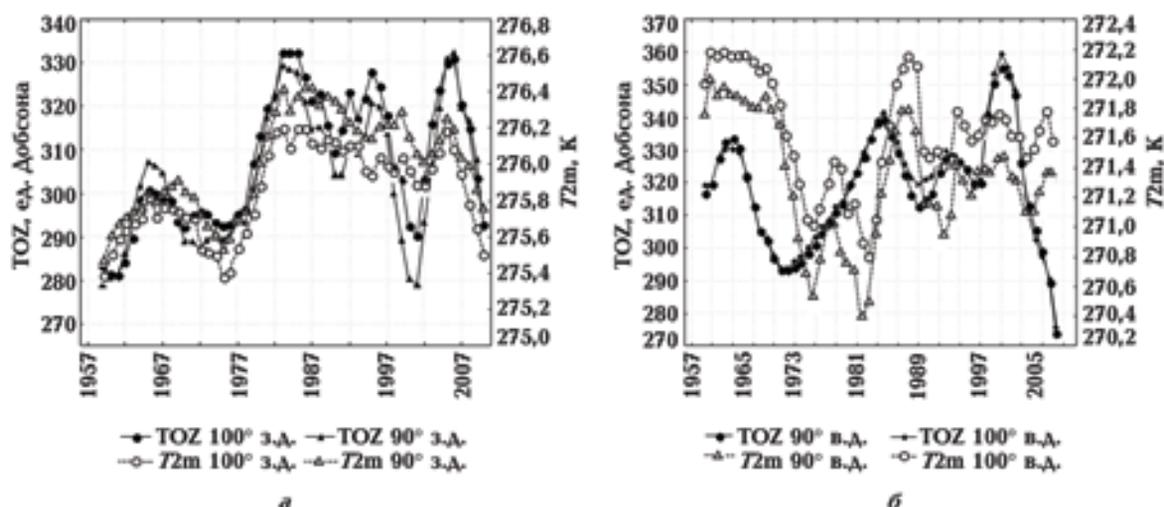


Рис. 7. Временные ряды изменения TOZ и приповерхностной температуры воздуха T_{2m} на 60° ю. ш. для двух долготных секторов (90° з. д., 100° з. д.) в Западной Антарктике (а) и двух долготных секторов (90° в. д., 100° в. д.) в Восточной Антарктике (б) за период 1957—2012 гг.

сов ю. ш.) и синхронность вариаций магнитного поля и изменения температуры в этом же регионе (сравните с рис. 2), а также отсутствие корреляции в области повышенных значений TOZ в секторе $0-180^\circ$ в. д.

На рис. 7, а показан временной ряд изменения TOZ и T_{2m} в Западной Антарктике (для двух долготных секторов) на 60° ю. ш. Очевидна синхронность изменения этих параметров в западно-антарктическом секторе. В то же время в Восточной Антарктике связь между изменчивостью озона и приповерхностной температурой не прослеживается (см. рис. 6, 7, б).

Таким образом, в меридиональном секторе с меньшей плотностью озона (сектор $\sim 100^\circ \pm 30^\circ$ з. д.) приземная температура более чувствительна к общей изменчивости его плотности (см. рис. 6). Возникает вопрос о причинах такой относительно повышенной чувствительности и ее связи с геомагнитным полем. Согласно рис. 4, предполагаемый нами механизм влияния магнитного поля на климат в Северном полушарии — через модуляцию интенсивности ГКЛ и образование озона в нижней стратосфере — не применим для Южного полушария. Вместе с тем анализ связи между вековой вариацией геомагнитного поля и TOZ показывает высокие статистически значимые положительные коэффициенты корреляции в областях с наибольшей интенсивностью F_{SV} (рис. 8, с. 56).

Отсюда можно заключить, что вариации озона в Южном полушарии связаны, скорее всего, с изменчивостью магнитного поля во време-

ни (т. е. с его вековыми вариациями), а не с его пространственными неоднородностями, как это наблюдается в Северном полушарии (см., например, [Бахмутов и др., 2011, 2014; Килифарска и др., 2015]). Помимо этого ниже показано, что основное влияние на TOZ оказывают не ГКЛ, а солнечные космические лучи (СКЛ).

III. Солнечные космические лучи и атмосферный озон

Солнечные протоны (СП), проникающие спорадически в земную атмосферу в результате вспышек на Солнце, также модулируются геомагнитным полем. Энергия СП гораздо меньше, чем энергия ГКЛ, и поглощаются они в верхних слоях атмосферы, хотя в некоторых случаях могут достигать нижней атмосферы. С целью проверки влияния потоков СП на общую плотность озона, как и в предыдущих разделах, были рассчитаны коэффициенты корреляции между среднегодовыми интегральными значениями СП (с энергией ≥ 10 МэВ) и TOZ в каждом узле сетки с шагом по широте и долготе 10° . На рис. 9, а (с. 56) показана карта статистически значимых коэффициентов корреляции между СП и TOZ, на рис. 9, б для сравнения приведены коэффициенты корреляции между ГКЛ и TOZ, которые ранее также были представлены на рис. 4, в.

Анализ рис. 9 а, б свидетельствует, что за последние 55 лет наблюдаются синхронные из-

менения СП и TOZ в большей части Южного полушария (за исключением Антарктического континента). Сравнение корреляционной карты с 55-летним средним общего содержания озона (рис. 9, а, фон) указывает на хорошее соответствие регионов с максимальным содержанием озона с областями положительной корреляции TOZ и СП (с энергией ≥ 10 МэВ). Отсюда можно сделать предположение о связи между интенсивностью потоков СП и общим содержанием озона.

Однако отрицательные аномалии озона (т. е. его отклонение от среднедесятилетней нормы) в Южном полушарии хорошо совпадают с областями антикорреляции TOZ и ГКЛ (см. рис. 9, г). Иначе говоря, ГКЛ способствуют образованию нижнестратосферного озона в Северном полушарии [Килифарска и др., 2015], но в

Южном полушарии картина обратная. Ее можно интерпретировать как отсутствие благоприятных условий для формирования O_4^+ . Как указывает один из авторов, подтвердивших существование O_4 в лабораторных условиях [de Petris, 2003], аффинитет кислородного иона O_2^+ к молекуле воды способствует образованию водяных кластеров вместо O_4^+ при наличии воды в атмосфере. Чтобы проверить это предположение, были рассмотрены сезонные различия во временных вариациях содержаний озона и водяного пара в нижней стратосфере на разных долготах для 50° ю. ш. (рис. 10, а, б). Очевидно, что плотность озона зимой выше, чем летом (рис. 10, а). Однако сезонные различия в изменении содержания водяного пара не наблюдаются, т. е. сезонные вариации содержания озона здесь не влияют на количество водя-

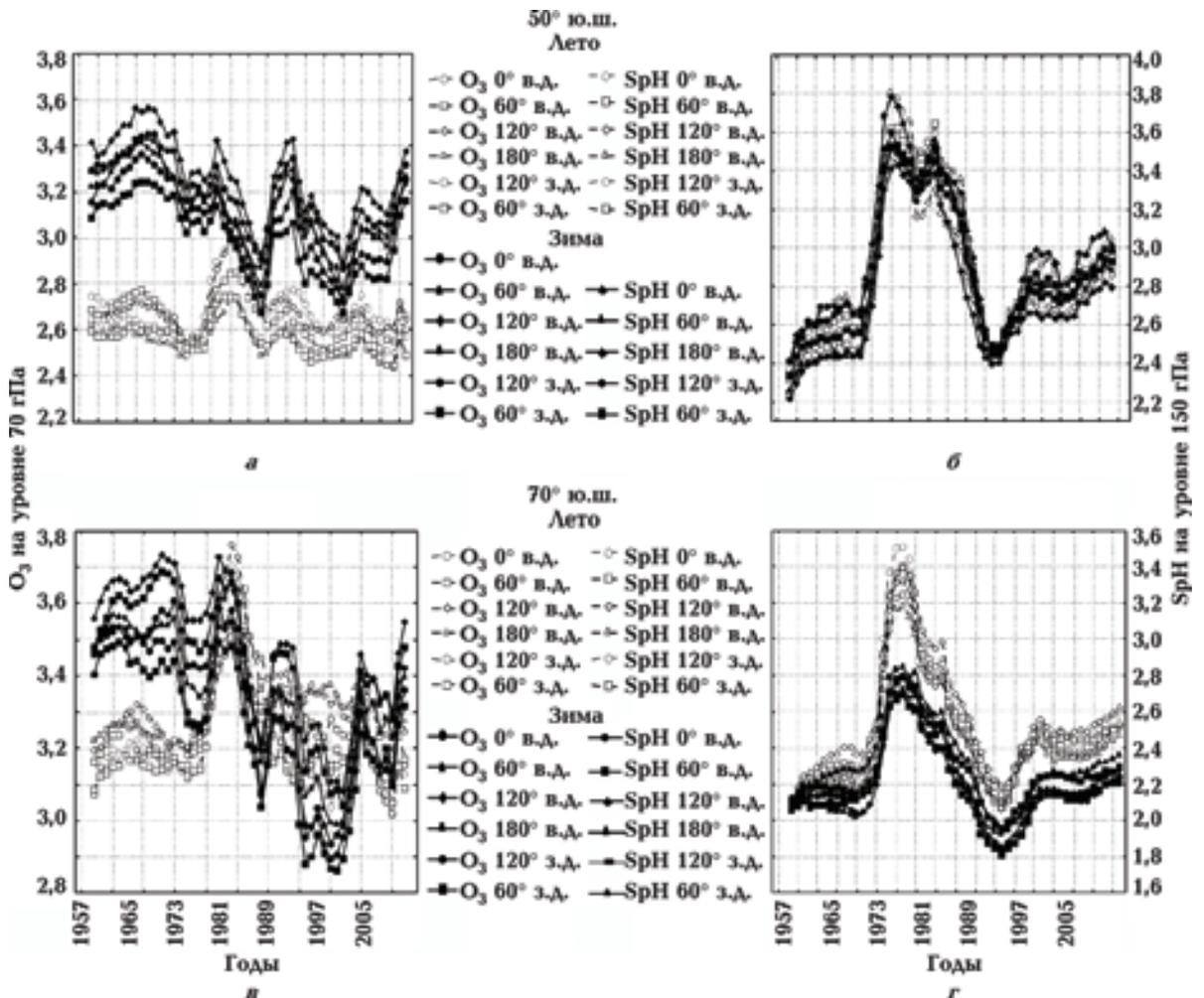


Рис. 10. Сезонная вариация O_3 на уровне 70 гПа (а, в) и удельной влажности SpH на уровне 150 гПа (б, г), определенные на разных долготах широт 50° ю. ш. (а, б) и 70° ю. ш. (в, г) для зимнего и летнего периодов.

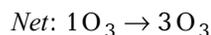
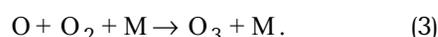
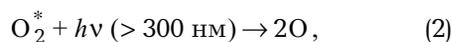
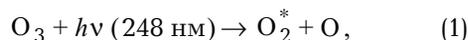
ного пара в нижней стратосфере, т. е. на эффективность автокаталитического цикла [Килифарска и др., 2015]. Отсюда можно заключить, что образование среднеширотного максимума содержания нижнестратосферного озона в Южном полушарии вряд ли возможно вследствие автокаталитического цикла, запускаемого ГКЛ. Более того, анализ вертикального профиля связи между ГКЛ и содержанием озона на разных стратосферных уровнях показал, что кроме полярных регионов, где установлены небольшие коэффициенты корреляции, на остальных широтах плотность озона не зависит от ГКЛ.

Анализ сезонных различий на других широтах в Южном полушарии свидетельствует, однако, что с увеличением широты (по мере приближения к Антарктиде) разница в сезонных вариациях содержания озона уменьшается, а удельной влажности на уровне 150 гПа — увеличивается (рис. 10, в, г).

Возвращаясь к рис. 9, а, в, постараемся выяснить, влияют ли солнечные протоны на общее содержание озона в Южном полушарии. Согласно измерениям и модельным экспериментам, на уровне мезосферы и верхней стратосферы озоновый слой сильно истощается в периоды солнечных протонных событий SPE [Jackman, McPeters, 1985]. Отклик TOZ на увеличение потока СП в Северном полушарии отрицательный, что согласуется с многочисленными данными, указывающими на истощение озонового слоя на уровнях мезосферы—нижней стратосферы (см., например, [Jackman, McPeters, 2004]). Заметим, что с учетом сезонности эффект проявляется в средних широтах, а не в полярной области. В Южном полушарии, однако, эффект влияния SPE на TOZ в средних широтах положительный. Остается открытым вопрос о том, могут ли влиять эти короткоживущие аномалии на среднегодовые значения общей плотности озона. Вероятно, долговременное воздействие СП на баланс TOZ влияет положительно (см. рис. 9, а).

В наших предыдущих публикациях [Kilifarska et al., 2013б; Kilifarska, 2015] был описан другой возможный механизм образования O_3 в нижней стратосфере. Он обусловлен изменением оптической толщины озонового слоя в результате его уменьшения на высотах мезосферы/верхней стратосферы в периоды геомагнитной возмущенности. Это приводит к более глубокому проникновению (т. е. на более низкие высоты) ультрафиолетовой радиации в полосе Хартли (200—320 нм), вследствие чего молекулы озона разрушаются и образуются ко-

лебательно-возбужденные молекулы кислорода O_2^* (реакция (1)). Последние легко диссоциируют под воздействием более длинноволновой ультрафиолетовой радиации, свободно проникающей глубже в стратосферу (реакция (2)), становясь, таким образом, источником образования дополнительного озона (реакция (3)). Этот эффект "самовосстановления озона" известен, как механизм Слангер [Slanger et al., 1988]:



С помощью специально созданной химической модели количественно оценен процесс самовосстановления озона вдоль высотного профиля [Kilifarska et al., 2013а]. Допустив, что под воздействием низкоэнергичных СП мезосферный O_3 был редуцирован на 30 %, мы рассмотрели, как эта аномалия влияет на профиль озона при ее распространении вниз (рис. 11). Кроме стандартного на рис. 11 представлены еще четыре профиля озона, соответствующие проникновению редуцированной аномалии озона на разные уровни, находящиеся соответственно выше 35 км, на 25, 20 и 15 км.

Согласно расчетам, занижение плотности озона выше 35 км изменяет весь профиль. Однако при продвижении отрицательной аномалии

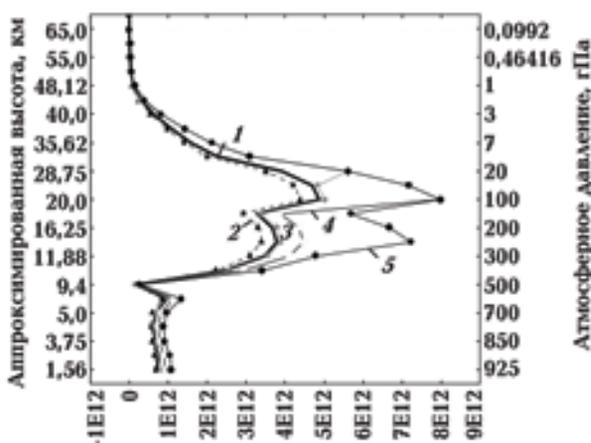


Рис. 11. Эффект самовосстановления озона в зависимости от высоты при уменьшении верхнего озонового слоя: более глубокое проникновение редуцированной аномалии O_3 увеличивает амплитуду эффекта самовосстановления. Профили O_3 : 1 — стандартный; 2—5 — аномалия O_3 на уровнях выше 35 км (2), 25 км (3), 20 км (4) и 15 км (5).

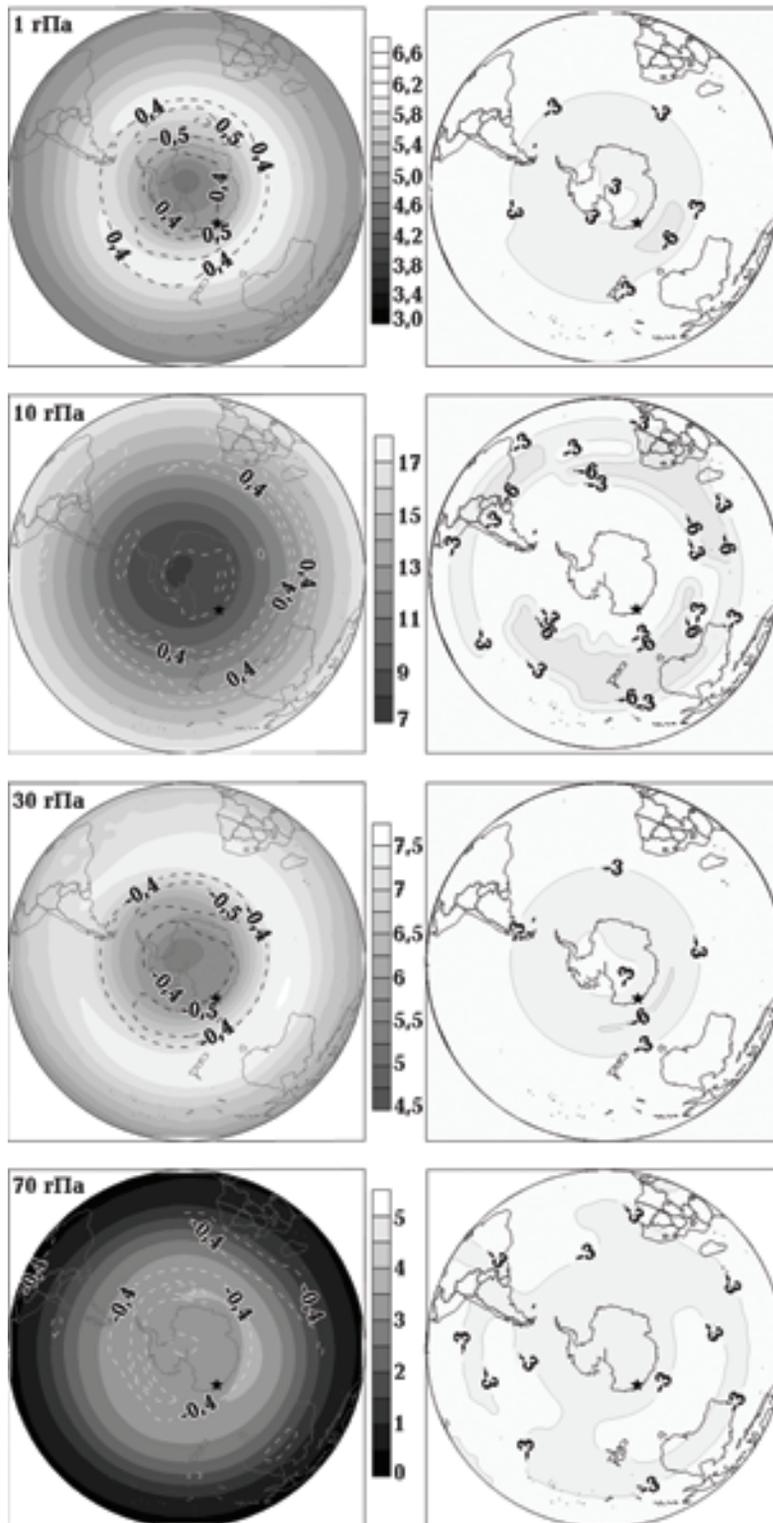


Рис. 12. Карты линейной корреляции СП с энергией $E \geq 10$ МэВ и озона для четырех стратосферных уровней (штриховые и сплошные непрерывные контуры слева). Фоновая заливка иллюстрирует содержание озона (соотношение смешивания: миллионных частей (10^{-6}) в единичном объеме). В правом столбце — временная задержка в реакции O_3 на воздействие СП.

O_3 вниз, вдоль профиля начинает сказываться эффект самовосстановления. При этом, чем глубже проникает аномалия, тем сильнее эффект самовосстановления (сравните, например, профили O_3 на 25 и 15 км, см. рис. 11). В соответствии с оценками, количество O_3 , созданного в результате этого процесса, может быть весьма существенно. В целом процесс менее продуктивный, чем автокаталитический цикл производства озона, так как зависит от спорадического воздействия солнечных частиц, глубины их проникновения, да и сам механизм менее эффективен. В отличие от автокаталитического цикла, где диссоциация одной молекулы O_4^+ производит четыре молекулы озона, результатом эффекта самовосстановления есть три новых молекулы O_3 . Возможно, это одна из причин более низкой плотности озона в Южном полушарии.

Чтобы проверить, насколько механизм самовосстановления O_3 влияет на его высотный профиль, мы оценили степень связи между СП и содержанием озона на четырех стратосферных уровнях (контуры на рис. 12, слева). Видно, что на всех уровнях корреляция между СП и содержанием озона отрицательная, с задержкой во времени порядка 3 лет (рис. 12). В отличие от остальных высот, уменьшение концентрации озона на уровне 10 гПа (за счет азотразрушающих циклов, активированных солнечными протонами) наблюдается и на средних, а не только на высоких широтах. Временная задержка в реакции O_3 на этом же уровне тоже больше — около 6 лет.

Эта особенность в пространственном распределении корреляции СП и содержания озона, вероятно, связана с тем, что количество O_3 уменьшается преимущественно в полярных районах мезосферы и верхней стратосферы, где количество СП максимальное. Воздушные массы, "бедные" озоном, "транспортируются" стратосферной циркуляцией вниз, что объясняет синхронное уменьшение содержания озона на всех уровнях полярной стратосферы с временной задержкой порядка 3 лет. Однако средних широт отрицательные аномалии могут достичь только при перемешивании атмосферных масс и/или диффузии, что требует гораздо больше времени. На уровне 10 гПа зимний O_3 уже не находится в фотохимическом равновесии [Brasseur, Solomon, 2005]. Следовательно, отрицательные аномалии (спровоцированные солнечными протонами) могут существовать довольно продолжительное время. Уменьшение оптической толщины озона, однако, активирует механизм

его самовосстановления на более низких высотах (реакции (1)—(3)). Этим может объясняться наблюдаемая положительная корреляция между СП и общей плотностью озона (рис. 9, а, в).

IV. Механизм влияния озона на климат в Южном полушарии

Будучи радиационно-активным газом, атмосферный озон способен влиять непосредственно на радиационный баланс Земли путем поглощения солнечного либо длинноволнового излучения Земли. Но анализ рис. 6 показывает, что в Южном полушарии отклик температуры на возможное воздействие со стороны озона сильнее в секторе с низкой плотностью озона (сектор $30—180^\circ$ з. д.).

Другим радиационно-активным компонентом в атмосфере является водяной пар. Согласно модельным экспериментам, его воздействие может превышать суммарный эффект от облаков и CO_2 [Climate ..., 2007; Gauss et al., 2006]. Особенно эффективное воздействие оказывает водяной пар вблизи тропопаузы, несмотря на его низкую концентрацию. Он поглощает длинноволновое излучение Земли, но не излучает его в пространство. Согласно численным экспериментам [Spencer, Braswell, 1997], даже небольшие колебания содержания водяного пара в верхних слоях тропосферы могут нелинейно сильно воздействовать на радиационный баланс Земли — это одна из причин явления, известного как "парниковый эффект".

В предлагаемом нами механизме влияния озона на климат [Kilifarska, 2012a; Килифарска и др., 2015] количество водяного пара на уровне верхняя тропосфера—нижняя стратосфера (UTLS) в значительной степени контролируется взаимодействием между влажноадиабатическим градиентом, температурой и влажностью. Рост количества O_3 и, соответственно, потепление воздуха вблизи тропопаузы приводят к увеличению влажноадиабатического градиента, что повышает стабильность воздушной массы. Термодинамически стабильные условия предотвращают поднятие паров H_2O вверх через тропопаузу. Напротив, понижение количества озона, следовательно, охлаждение области тропопаузы, уменьшает влажноадиабатический градиент, увеличивая нестабильность воздушных масс. Это позволяет более влажному воздуху проникать через тропопаузу в нижнюю стратосферу, повышая удельную влажность вблизи тропопаузы. Следовательно, изменчивость

количества озона вблизи тропопаузы одновременно влияет на изменение температуры и влажности на наиболее чувствительных к исходящей длинноволновой радиации высотах вблизи тропопаузы.

Проведем анализ данных по Южному полушарию с привлечением изложенного выше механизма, выполнив сравнение средних за 55 лет климатических параметров по данным реанализов ERA-40 и ERA Interim, что ранее было сделано для средних широт Северного полушария [Килифарска и др., 2015], а именно: озона на уровне 70 гПа, удельной влажности на уровне 150 гПа и температуры воздуха у поверхности земли (рис. 13). Обращает внимание хорошее совпадение распределения максимума озона и минимума удельной влажности (рис. 13, а). Кроме того, в пределах Антарктического континента можно выделить участки с повышенной влажностью, которые соответствуют районам с менее низкими температурами (рис. 13, б).

В соответствии с механизмом, предложенным нами в работе [Килифарска и др., 2015], уменьшение концентрации нижнестратосферного озона в итоге должно привести к повышению приземной температуры, что и наблюдается в Западной Антарктике на протяжении последних более 60 лет. При этом в Восточной Антарктике значения нижнестратосферного озона были постоянно выше, чем в Западной Антарктике (рис. 14, а, с. 65).

Вместе с тем анализ временных рядов удельной влажности на уровне 150 гПа подтверждает, что Западная Антарктида за последние 55 лет характеризовалась повышенной плотностью водяного пара вблизи тропопаузы (рис. 14, б). Это означает, что большая часть длинноволновой радиации в указанном секторе оказалась в "ловушке" в тропосфере, что и могло привести к непрерывному потеплению в регионе. В то же время воздушные массы над побережьем Восточной Антарктики (на уровне 150 гПа) оставались "прозрачными" для длинноволнового излучения Земли, что могло привести к охлаждению данного региона.

Представленные в работе [Evtushevsky et al., 2008] результаты исследования в области UTLS в Западной Антарктике (в районе моря Уэдделла) показывают, что зимой тропопауза здесь располагается на 3—4 км выше, чем в Австралийско-Новозеландском секторе. Это может быть одним из объяснений систематически повышенной влажности в Западной Антарктике (см. рис. 14, б).

Таким образом, представленная нами связь между: а) геомагнитным полем, б) нижнестра-

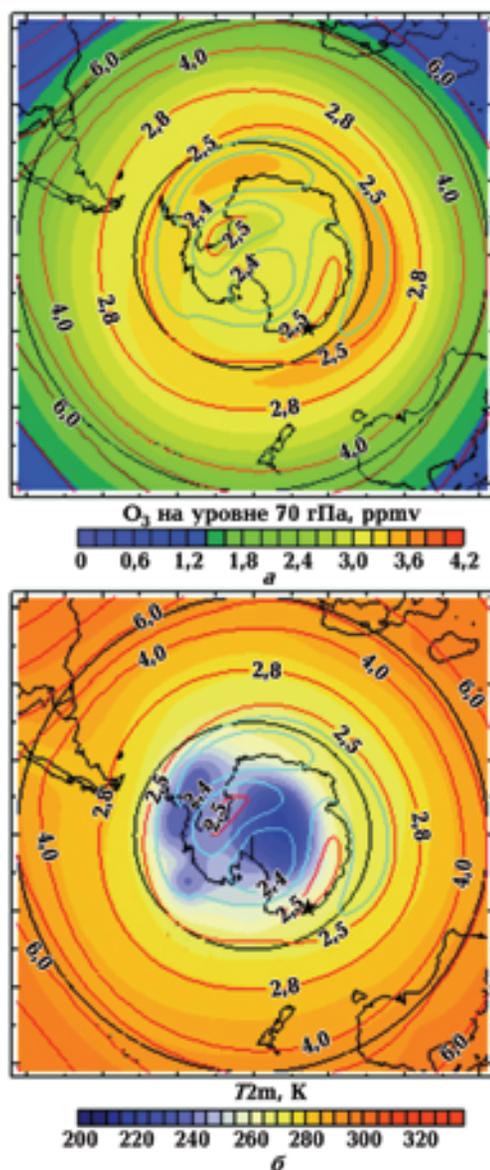


Рис. 13. Сравнение пространственного распределения средних за 55 лет значений озона на уровне 70 гПа (фоновая заливка в цвете) и удельной влажности на уровне 150 гПа (синие контуры соответствуют значениям меньше 2,45) (а); пространственное распределение температуры воздуха у поверхности земли и удельной влажности на уровне 150 гПа (б). Области максимумов концентрации озона соответствуют минимумам удельной влажности (а), а максимумы удельной влажности располагаются в более теплых районах в пределах Антарктического континента (б).

тосферным озоном, в) температурой и влажностью вблизи тропопаузы, г) температурой приземного воздуха, может объяснить наблюдаемую асимметрию в изменении температуры разных частей Антарктического континента за последние полвека.

V. Механизм геомагнитного контроля над интенсивностью и глубиной проникновения частиц в атмосфере

Магнитное поле Земли является “экраном” для проникновения заряженных частиц из космоса к ее поверхности. Особенности проникновения и движения частиц в геомагнитном поле качественно описывает теория Штермера, применимая для дипольного приближения геомагнитного поля в низких и средних широтах. Способность частицы достигать определенной точки в магнитном поле характеризует жесткость геомагнитного обрезания (импульс, отнесенный на единицу заряда). Ее распределение в первом приближении соответствует описанию геомагнитного поля как поля смещенного относительно центра Земли и наклоненного диполя. В высоких широтах (выше 60°) определение жесткости обрезания неприменимо. В полярных

шапках (вокруг магнитных полюсов) возможно проникновение даже частиц низких энергий. В этой области используются экспериментальные данные о проникновении частиц СКЛ. Динамика низкоширотной границы их проникновения определяется геомагнитной возмущенностью.

Потери энергии заряженных частиц при движении через атмосферу описываются формулой Бете—Блоха (см. например, [Velinov et al., 2013a]). В нерелятивистском приближении формулу Бете—Блоха можно записать (см., например, [Leung, 1989; Ziegler, 1999]) в виде

$$-\left[\frac{dE}{dx}\right]_0 = \frac{4\pi z^2 e^4}{mv^2} NZ \ln\left(\frac{2mv^2}{I}\right), \quad (4)$$

где E — кинетическая энергия частицы; x — путь, пройденный заряженной частицей в веществе; z и Z — атомные номера набегающей

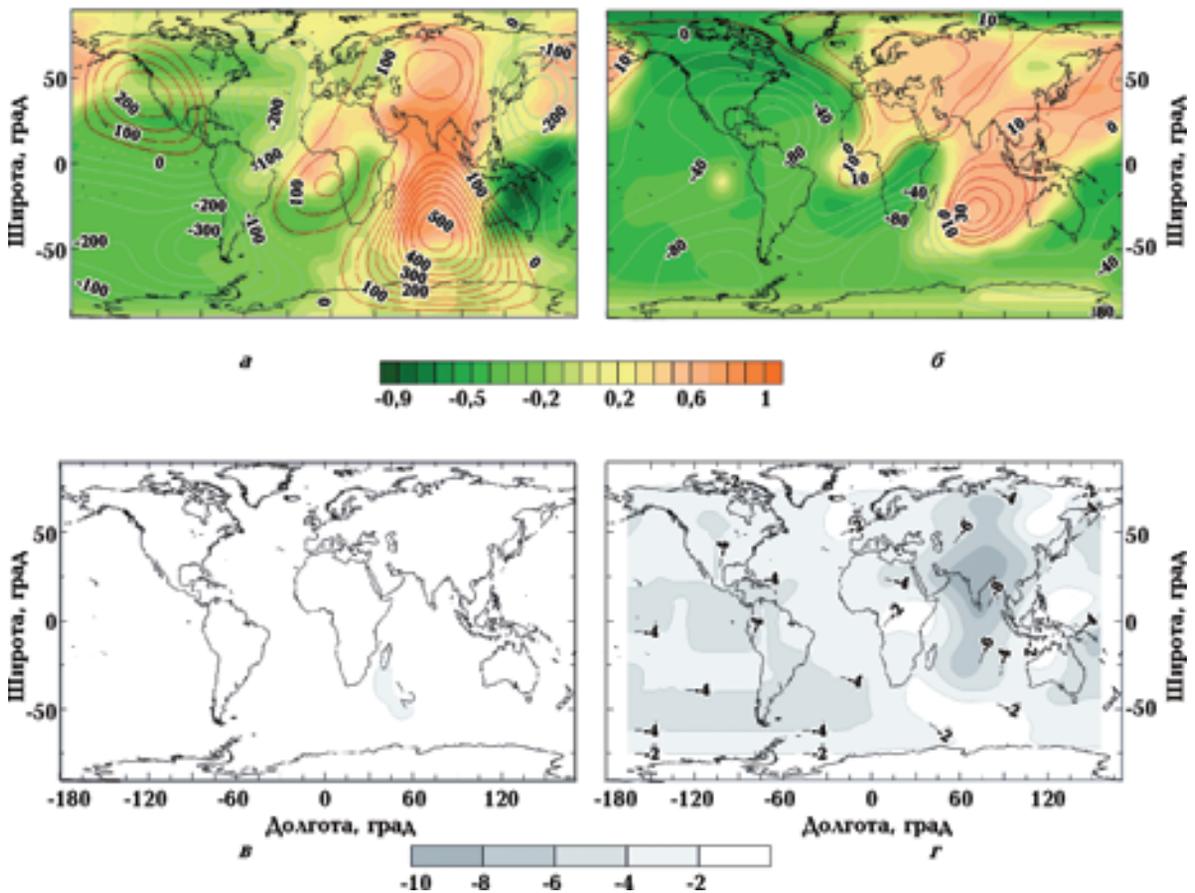


Рис. 15. Сравнение карты корреляции главного геомагнитного поля и ГКЛ (цветовой фон) с долготным градиентом поля; красные контуры — положительный, синие — отрицательный градиент геомагнитного поля (а). Карта корреляции геомагнитного поля с СП (цветовой фон) в сравнении с вековым ходом геомагнитного поля: красные контуры — положительные значения, синие — отрицательные (б). В нижнем ряду представлено время задержки на воздействие геомагнитного поля (в, г).

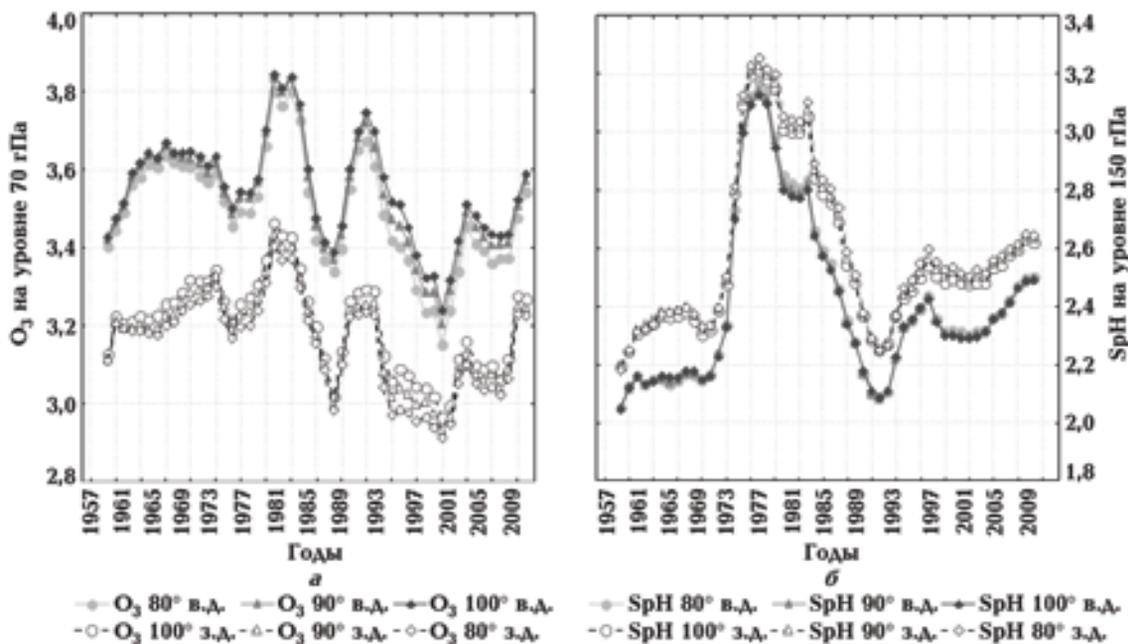


Рис. 14. Изменчивость нижнестратосферного озона на широте 60° ю. ш. в Восточной (серые символы, на долготах 80, 90 и 100° в. д.) и Западной (черные символы, на долготах 80, 90 и 100° з. д.) Антарктике (а). Обратите внимание на постоянно более высокие значения содержания озона в Восточной Антарктике, б — временные ряды водяного пара на 150 гПа на широте 60° ю. ш. над Восточной (серые точки) и Западной (черные символы) Антарктикой. На этих высотах воздух в Восточной Антарктике оставался более сухим на протяжении полувека.

и рассеивающей частиц; v — скорость частицы; I — средний ионизационный потенциал атомов поглощающего вещества; N — плотность атмосферы в единичном объеме; e — заряд электрона; m — масса электрона.

Основной результат, который следует из формулы (4), заключается в том, что удельная потеря энергии заряженной частицы на ионизацию пропорциональна квадрату заряда частицы, концентрации электронов в среде и некоторой функции от скорости $\varphi(v) \sim \frac{1}{v^2}$ и не зависит от массы частицы, т. е. чем быстрее перемещается частица, тем меньше энергии она передает на молекулы среды. Следовательно, в регионах с более высоким градиентом магнитного поля Земли, где скорость частиц замедляется, потери энергии частиц через рассеяние от атмосферных молекул должны увеличиваться, количество вторичных электронов и ионов будет увеличиваться.

Кроме того, за счет неравномерного магнитного поля Земли в направлении, перпендикулярном к вектору его индукции \mathbf{V} , и кривизны поля возникает дополнительная компонента, влияющая на траекторию частицы, известная как магнитный дрейф поперек силовых ли-

ний, зависящий от заряда частиц, что означает разделение положительных и отрицательных зарядов. При таком разделении возникает электрическое поле \mathbf{E} в направлении, перпендикулярном к \mathbf{V} . Совместное действие обоих полей на заряженные частицы вызывает их $\mathbf{E} \times \mathbf{V}$ дрейф (перпендикулярно к обоим векторам), который приводит к потере заряженных частиц в результате ионизационно-рекомбинационных процессов с молекулами окружающей среды.

Этим можно объяснить неравномерность в пространственном распределении корреляции между геомагнитным полем и ГКЛ, поток которых приблизительно однороден на верхней границе атмосферы (рис. 15, а, с. 64). Необходимо напомнить, что более 90 % ГКЛ состоят из протонов, вращающихся вокруг магнитной силовой линии против часовой стрелки (направление магнитного поля от наблюдателя). Поэтому они входят в атмосферу Земли преимущественно с запада. Из рис. 15 видно, что положительные коэффициенты корреляции геомагнитного поля с ГКЛ хорошо соответствуют положительному градиенту магнитного поля. Напротив, отрицательная корреляция наблюдается преимущественно в регионах ослабления интенсивности геомагнитного поля.

Анализируя связь между магнитным полем и потоком СП мы выявили, что пространственное распределение их корреляции больше соответствует пространственной картине векового хода магнитного поля (рис. 15, б). В I, II разделах показано, что приземная температура в Южном полушарии (см. рис. 1, 2) и общее содержание озона (см. рис. 5, 8) коррелируют лучше с вековым ходом (F_{sv}) геомагнитного поля. Кроме того, в разделе III мы связываем вариации TOZ в Южном полушарии с СП. Таким образом, результаты, представленные на рис. 15, б, а именно, что СП модулируются преимущественно F_{sv} , проясняют более сильную чувствительность TOZ в Южном полушарии к вековому ходу геомагнитного поля.

VI. Обсуждение

Гипотеза о влиянии геомагнитного поля на долговременные изменения климата обсуждается в научном сообществе достаточно долго, но, ввиду отсутствия механизма такого влияния, она не получила должного внимания. Существуют гипотезы о влиянии корпускулярного излучения на облачность [Dickinson, 1975; Tinsley, 1996; Svensmark, Friis-Christensen, 1997] и/или прозрачность атмосферы [Пудовкин, Бабушкина, 1991; Пудовкин, Распопов, 1992; Пудовкин, Веретененко, 1992; Svensmark, 1998]. Поскольку геомагнитное поле модулирует интенсивность потока энергичных частиц, достигающих атмосферы Земли, долгое время считалось, что это единственно возможный механизм влияния геомагнитного поля на климат.

Предлагаемый нами механизм основан на влиянии заряженных частиц на баланс озона вблизи тропопаузы. В отличие от хорошо известных механизмов уничтожения O_3 в мезосфере и верхней стратосфере (через активацию солнечными протонами NO_x и HO_x озоноразрушающих циклов), представляем вниманию читателя иной механизм воздействия энергичных частиц на атмосферный озон. Этот механизм учитывает не только уничтожение озона, но и его формирование в нижней стратосфере различными путями: I — ионно-молекулярный автокаталитический цикл производства озона, инициированный ГКЛ, для Северного полушария [Kilifarska, 2012a, 2013]; II — эффект "самовосстановления" озона, инициированный солнечными энергичными частицами, для Южного полушария [Kilifarska et al., 2013б]. Эти разные механизмы влияния на атмосферный озон тесно

связаны с глубиной проникновения частиц в атмосферу Земли. Последнее зависит не только от энергии частиц, но и от интенсивности и конфигурации геомагнитного поля.

В статье обращается внимание на тот факт, что максимальные значения общего содержания озона в Южном полушарии обусловлены высокоэнергичными частицами солнечных протонных событий. Этот результат противоречит известному кратковременному эффекту солнечных частиц, уменьшающему плотность озона в средней атмосфере. Повышенная чувствительность TOZ в Южном полушарии к солнечным частицам (непосредственно поступающим от Солнца или захваченным в радиационных поясах Земли) не согласуется с высокой чувствительностью озона к ГКЛ в Северном полушарии [Kilifarska, 2012a, b; Kilifarska et al., 2013a; Бахмутов и др., 2014].

Принимая во внимание эффект модуляции при неоднородно распределенной напряженности геомагнитного поля, различие в воздействии частиц на атмосферный озон становится намного яснее. Например, сильное геомагнитное поле в Северном полушарии не позволяет менее энергичным солнечным протонам проникнуть глубже в атмосферу, и, как показано в работе [Kilifarska et al., 2013б], их основной эффект заключается в потерях озона вдоль профиля. В Южном полушарии, однако, геомагнитное поле в среднем слабее (особенно в районе Южно-Атлантической аномалии) и позволяет солнечным частицам разрушать озон глубже в стратосфере, активируя, таким образом, механизм "самовосстановления" озона. Согласно модельным расчетам, амплитуда "самовосстановления" озона возрастает при нисходящем распространении "отрицательной" озоновой аномалии (редуцированного озонового профиля) [Kilifarska et al., 2013б]. Это объясняет повышенную чувствительность долгосрочной изменчивости озона в Южном полушарии к воздействию энергичных частиц солнечного происхождения.

Кроме того, анализ пространственно-временной изменчивости геомагнитного поля, приземной температуры воздуха, озона и влажности вблизи тропопаузы свидетельствует о ярко выраженном согласовании между ними в Западной Антарктике. Снижение величины геомагнитного поля и проникновение частиц в этом долготном секторе отражаются на общем содержании озона, которое здесь постоянно меньше, чем на других долготах (см. рис. 9). По этой причине эффект его влияния на температуру тропопаузы существенно ослаблен, что усили-

вает термодинамическую нестабильность воздуха и позволяет большему количеству водяного пара проникать вверх на уровень верхней тропосферы/нижней стратосферы (UTLS).

Согласно численным экспериментам с климатическими моделями, вследствие нелинейного характера связи между количеством водяного пара на этих высотах и парниковым эффектом, даже незначительные колебания водяного пара на уровне UTLS приводят к изменениям в радиационном балансе Земли. Следовательно, повышение удельной влажности усиливает парниковый эффект, что может быть хорошим объяснением потепления в Западной Антарктике в течение последнего полувека. Более слабые тенденции в понижении температуры в Восточной Антарктиде могут быть связаны с более высокой плотностью озона и более "сухой" верхней тропосферой в этом регионе.

Это простое объяснение наблюдаемой в течение прошедшего полувека загадки в эволюции климата Антарктики выходит за пределы

обычных интерпретаций изменчивости климата. Привлечение геомагнитного поля в качестве одного из основных "игроков", определяющих изменчивость климатической системы, показывает, что климат Земли может иметь значительную временную и пространственную изменчивость, даже если другие внешние воздействия остаются неизменными — только как следствие вариаций геомагнитного поля.

Общая схема предлагаемого механизма связи геомагнитного поля и климата показана на рис. 16. Процесс начинается с геомагнитной модуляции интенсивности и глубины проникновения энергичных частиц в атмосферу Земли, что приводит к активации ионно-молекулярных реакций, влияющих на концентрацию озона вблизи тропопаузы. В Северном полушарии на этом уровне происходит максимальное поглощение ГКА, где они активируют автокаталитический цикл производства O_3 . В Южном полушарии более эффективно воздействие солнечных протонов, активирующих механизм самовосстановления озона. В Северном полушарии более эффективно воздействие солнечных протонов, активирующих механизм самовосстановления озона. В Южном полушарии более эффективно воздействие солнечных протонов, активирующих механизм самовосстановления озона.



Рис. 16. Связь между геомагнитным полем и климатическими параметрами.

мовосстановления озона на более низких уровнях атмосферы, после разрушения его на верхних уровнях. Вариации плотности озона вблизи тропопаузы влияют на температуру в области UTLS. Чем выше здесь температура, тем выше влажноадиабатический градиент температуры и тем более "сухим" становится этот слой (уменьшается его удельная влажность). И наоборот, охлаждение области UTLS дает возможность водяному пару легче распространяться вверх. Такие небольшие колебания влажности в области UTLS в зимний период влияют на радиационный баланс планеты (через отражен-

ное длинноволновое излучение Земли) и, как следствие, на приземную температуру воздуха.

Безусловно, описанный здесь механизм требует дальнейшего тестирования и не является единственно возможным. Полученные результаты справедливы для зимнего времени, когда атмосфера более устойчива, и на временных шкалах не менее первых десятков лет. Однако связь климата с геомагнитным полем представляется вполне реальной, а его изменения также необходимо учитывать в долгосрочных климатических моделях как один из контролирующих климат факторов.

Список литературы

- Бахмутов В. Г., Мартазинова В. Ф., Иванова Е. К., Мельник Г. В. Изменения главного магнитного поля и климата в XX веке. *Доповіди НАН України. Науки про Землю*. 2011. № 7. С. 90—94.
- Бахмутов В. Г., Мартазинова В. Ф., Килифарска Н. А., Мельник Г. В., Иванова Е. К. Связь изменений климата с геомагнитным полем. 1. Пространственно-временная структура магнитного поля Земли и климата в XX в. *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 1. С. 81—104.
- Килифарска Н. А., Бахмутов В. Г., Мельник Г. В. Связь изменений климата с геомагнитным полем. 2. Возможный механизм. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 5. С. 66—92.
- Мартазинова В. Ф., Тимофеев В. Е., Иванова Е. К. Современный региональный климат Антарктического полуострова и станции Академик Вернадский. *Укр. антаркт. журн.* 2010. № 9. С. 231—248.
- Пудовкин М. И., Бабушкина С. В. Влияние электромагнитного и корпускулярного излучений солнечной вспышки на интенсивность зональной циркуляции атмосферы. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1991. Т. 31. № 3. С. 493—499.
- Пудовкин М. И., Веретененко С. В. Вариации меридионального профиля атмосферного давления в ходе геомагнитного возмущения. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1992. Т. 32. № 1. С. 118—122.
- Пудовкин М. И., Распопов О. М. Механизм влияния солнечной активности на состояние нижней атмосферы и метеопараметры. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1992. Т. 32. № 5. С. 1—22.
- Brasseur G., Solomon S., 2005. *Aeronomy of the middle stratosphere: chemistry and physics of the stratosphere and mesosphere*. Dordrecht, Netherlands: Springer, 646 p. DOI:10.1007/1-4020-3824-0.
- de Petris G., 2003. Atmospherically relevant ion chemistry of ozone and its cation. *Mass Spectrom. Rev.* 22, 251—271. DOI: 10.1002/mas.10053.
- Dickinson R. E., 1975. Solar variability and the lower atmosphere. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 56, 1240—1248.
- Evtushevsky O. M., Grytsai A. V., Klekociuk A. R., Milinevsky G. P., 2008. Total ozone and tropopause zonal asymmetry during the Antarctic spring. *J. Geophys. Res.* 113, D00B06. DOI:10.1029/2008jd009881.
- Forster P. M., Shine K., 1997. Radiative forcing and temperature trends from stratospheric ozone changes. *J. Geophys. Res.* 102(D9), 10841—10855.
- Gauss M., Myhre G., Isaksen I. S. A., Grewe V., Pitari G., Wild O., Collins W. J., Dentener F. J., Ellingsen K., Gohar L. K., Hauglustaine D. A., Iachetti D., Lamarque J.-F., Mancini E., Mickley L. J., Prather M. J., Pyle J. A., Sanderson M. G., Shine K. P., Stevenson D. S., Sudo K., Szopa S., Zeng G., 2006. Radiative forcing since preindustrial times due to ozone change in the troposphere and the lower stratosphere. *Atmos. Chem. Phys.* 6, 575—599.
- Climate Change, 2007. *The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, 2007. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-frontmatter.pdf>
- Jackman C. H., McPeters R. D., 2004. The Effect of Solar Proton Events on Ozone and Other Constituents, in Solar Variability and Its Effects on Climate. In: *Solar Variability and Its Effect on Climate*. Vol. 141. American Geophysical Union, 305—321. DOI:10.1029/141GM21.
- Jackman C. H., McPeters R. D., 1985. The response of ozone to solar proton events during solar cycle 21: A theoretical interpretation. *J. Geophys. Res.* 90(D5), 7955—7966. DOI:10.1029/JD090iD05p07955.

- 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., 2015. Bi-decadal solar influence on climate, mediated by near tropopause ozone. *J. Atmos. Solar.-Terr. Phys.* 136, 216—230. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2015.08.005i>
- Kilifarska N.A., 2012a. Mechanism of lower stratospheric ozone influence on climate. *Int. Rev. Phys.* 6(3), 279—289.
- Kilifarska N.A., 2012b. Ozone as a mediator of galactic cosmic rays' influence on climate. *Sun and Geosphere* 7(1), 97—102.
- Kilifarska N.A., Bakmutov V.G., Melnyk G.V., 2013a. Energetic particles influence on the southern Hemisphere ozone variability. *Compt. Rend. Acad. Bulg. Sci.* 66, 1613—1622.
- Kilifarska N.A., Bakmutov V.G., Melnyk G.V., 2013b. Geomagnetic influence on Antarctic Climate — Evidences and Mechanism. *Int. Rev. Phys.* 7(3), 242—252.
- King J.W., 1974. Weather and Earth's magnetic field. *Nature* 274, 131—134.
- Kwok R., Comiso J.C., 2002. Spatial patterns of variability in Antarctic surface temperature: Connections to the Southern Hemisphere Annular Mode and the Southern Oscillation. *Geophys. Res. Lett.* 29, 14. DOI:10.1029/2002GL015415.
- Leung P.T., 1989. Bethe stopping-power theory for heavy target atoms. *Phys. Rev. A*, 40(9), 5417—5419.
- 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—1112.
- Schneider D.P., Steig E., van Ommen T.D., Dixon D.A., Mayewski P., Jones J.M., Bitz C.M., 2006. Antarctic temperatures over the past two centuries from ice cores. *Geophys. Res. Lett.* 33, L16707. DOI:10.1029/2006GL027057.
- Slanger T.G., Jusinski L.E., Black G., Gadd G.E., 1988. A new laboratory source of ozone and its atmospheric implications. *Science* 241, 945—950.
- Spencer R.W., Braswell W.D., 1997. How Dry is the Tropical Free Troposphere? Implications for Global Warming Theory. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 78, 1097—1106.
- Steig E.J., Schneider D.P., Rutherford S.D., Mann M.E., Comiso J.C., Shindell D.T., 2009. Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year. *Nature* 457, 459—463. DOI:10.1038/nature07669.
- Stuber N., Sausen R., Ponater M., 2001. Stratosphere adjusted radiative forcing calculations in a comprehensive climate model. *Theor. Appl. Climatol.* 68, 125—135.
- Svensmark H., 1998. Influence of cosmic rays on Earth's climate. *Phys. Rev. Lett.* 81, 5027—5030.
- Svensmark H., Friis-Christensen E., 1997. Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage — a missing link in solar-climate relationships. *J. Atmos. Solar.-Terr. Phys.* 59, 1225—1232.
- Thompson D.W.J., Solomon S., 2002. Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change. *Science* 296, 895—899.
- Tinsley B.A., 1996. Solar wind modulation of the global electric circuit and apparent effects on cloud microphysics, latent heat release, and tropospheric dynamics. *Earth Planet. Space Geomag. Geoelectr.* 48(1), 165—175.
- Velinov P.I.Y., Asenovski S., Kudela K., Lastovicka J., Mateev L., Mishev A., Tonev P., 2013a. Impact of cosmic rays and solar energetic particles on the Earth's environment. *J. Space Weather Space Clim.* 3(A14), 1—17.
- Velinov P.I.Y., Asenovski S., Mateev L., 2013b. Numerical calculation of cosmic ray ionization rate profiles in the middle atmosphere and low ionosphere with relation to characteristic energy intervals. *Acta Geophys.* 61(2), 494—509.
- Vieira L.E.A., da Silva L.A., Guarnieri F.L., 2008. Are changes of the geomagnetic field intensity related to changes of the tropical Pacific sea-level pressure during the last 50 years? *J. Geophys. Res.* 113, A08226. DOI:10.1029/2008JA013052.
- Wang W.-Ch., Pinto J.P., Yunk Y.L., 1980. Climatic effect due to the halogenated compound in the Earth atmosphere. *Atmos. Sci.* 37, 333—338.
- 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.
- Wirth V., 1993. Quasi-stationary planetary waves in total ozone and their correlation with lower stratospheric temperature. *J. Geophys. Res.* 98, 8873—8882.
- Ziegler J.F., 1999. The stopping of energetic light ions in elemental matter. *J. Appl. Phys. Rev.* 85, 1249—1272.

Relationship of climate changes with geomagnetic field.

P. 3. Northern and Southern hemispheres

© N.A. Kilifarska, V.G. Bakmutov, G.V. Melnyk, 2016

Differences of relations between geomagnetic field and climate for Northern and Southern hemispheres considered earlier have been shown. They are connected, first of all, with the depth of penetration of the charged particles into the Earth's atmosphere, modulated by geomagnetic field and their impact on the ozone balance near the tropopause. In the Northern hemisphere ozone formation in the lower stratosphere occurs during ionic-molecular autocatalytic cycle of ozone production, initiated by GCR, and in the Southern one — as a result of "self-restoration" of ozone initiated by solar energetic particles. Explanation of the observed simultaneous warming in the Western Antarctica and the fall of temperature in the Central and Eastern Antarctica has also been presented.

Key words: geomagnetic field, climate, mechanism of relation.

References

- Bakmutov V.G., Martazinova V.F., Ivanova E.K., Melnyk G.V., 2011. Changes of in the main magnetic field and climate in the twentieth century. *Dopovidi NAN Ukrainy. Nauky pro Zemlyu* (7), 90—94 (in Russian).
- Bakmutov V.G., Martazinova V.F., Kilifarska N.F., Melnyk G.V., Ivanova E.K., 2014. Geomagnetic field and climate variability. 1. Spatial-temporal distribution of geomagnetic field and climatic parameters during XX century. *Geofizicheskii zhurnal* 36(1), 81—104 (in Russian).
- Kilifarska N.A., Bakmutov V.G., Melnyk G.V., 2015. Relation between geomagnetic field and climate variability. 2. Probable mechanism. *Geofizicheskii zhurnal* 37(5), 66—92 (in Russian).
- Martazinova V.F., Timofeyev V.E., Ivanova E.K., 2010. Modern regional climate of the Antarctic Peninsula and the Vernadsky Station. *Ukrayins'kyi antarktychnyy zhurnal* (9), 231—248 (in Russian).
- Pudovkin M.I., Babushkina S.V., 1991. Influence of electromagnetic and corpuscular radiation of a solar flare on the intensity of zonal circulation of the atmosphere. *Geomagnetizm i aeronomiya* 31(3), 493—499 (in Russian).
- Pudovkin M.I., Veretenenko S.V., 1992. Variations meridional atmospheric pressure profile during geomagnetic disturbance. *Geomagnetizm i aeronomiya* 32(1), 118—122 (in Russian).
- Pudovkin M.I., Raspopov O.M., 1992. The mechanism of influence of solar activity on the state of the lower atmosphere and meteorological parameters. *Geomagnetizm i aeronomiya* 32(5), 1—22 (in Russian).
- Brasseur G., Solomon S., 2005. Aeronomy of the middle stratosphere: chemistry and physics of the stratosphere and mesosphere. Dordrecht, Netherlands: Springer, 646 p. DOI:10.1007/1-4020-3824-0.
- de Petris G., 2003. Atmospherically relevant ion chemistry of ozone and its cation. *Mass Spectrom. Rev.* 22, 251—271. DOI: 10.1002/mas.10053.
- Dickinson R.E., 1975. Solar variability and the lower atmosphere. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 56, 1240—1248.
- Evtushevsky O.M., Grytsai A.V., Klekociuk A.R., Milinevsky G.P., 2008. Total ozone and tropopause zonal asymmetry during the Antarctic spring. *J. Geophys. Res.* 113, D00B06. DOI:10.1029/2008jd009881.
- Forster P.M., Shine K., 1997. Radiative forcing and temperature trends from stratospheric ozone changes. *J. Geophys. Res.* 102(D9), 10841—10855.
- Gauss M., Myhre G., Isaksen I.S.A., Grewe V., Pitari G., Wild O., Collins W.J., Dentener F.J., Ellingsen K., Gohar L.K., Hauglustaine D.A., Iachetti D., Lamarque J.-F., Mancini E., Mickley L.J., Prather M.J., Pyle J.A., Sanderson M.G., Shine K.P., Stevenson D.S., Sudo K., Szopa S., Zeng G., 2006. Radiative forcing since preindustrial times due to ozone change in the troposphere and the lower stratosphere. *Atmos. Chem. Phys.* 6, 575—599.
- Climate Change, 2007. The Physical Science Basis. Cambridge University Press, 2007. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-frontmatter.pdf>
- Jackman C.H., McPeters R.D., 2004. The Effect of Solar Proton Events on Ozone and Other Constituents, in Solar Variability and Its Effects on Climate. In: *Solar Variability and Its Effect on Cli-*

- mate. Vol. 141. American Geophysical Union, 305—321. DOI:10.1029/141GM21.
- Jackman C.H., McPeters R.D., 1985. The response of ozone to solar proton events during solar cycle 21: A theoretical interpretation. *J. Geophys. Res.* 90(D5), 7955—7966. DOI:10.1029/JD090iD05p07955.
- 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., 2015. Bi-decadal solar influence on climate, mediated by near tropopause ozone. *J. Atmos. Solar.-Terr. Phys.* 136, 216—230. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2015.08.005i>
- Kilifarska N.A., 2012a. Mechanism of lower stratospheric ozone influence on climate. *Int. Rev. Phys.* 6(3), 279—289.
- Kilifarska N.A., 2012b. Ozone as a mediator of galactic cosmic rays' influence on climate. *Sun and Geosphere* 7(1), 97—102.
- Kilifarska N.A., Bakmutov V.G., Melnyk G.V., 2013a. Energetic particles influence on the southern Hemisphere ozone variability. *Compt. Rend. Acad. Bulg. Sci.* 66, 1613—1622.
- Kilifarska N.A., Bakmutov V.G., Melnyk G.V., 2013b. Geomagnetic influence on Antarctic Climate — Evidences and Mechanism. *Int. Rev. Phys.* 7(3), 242—252.
- King J.W., 1974. Weather and Earth's magnetic field. *Nature* 274, 131—134.
- Kwok R., Comiso J.C., 2002. Spatial patterns of variability in Antarctic surface temperature: Connections to the Southern Hemisphere Annular Mode and the Southern Oscillation. *Geophys. Res. Lett.* 29, 14. DOI:10.1029/2002GL015415.
- Leung P.T., 1989. Bethe stopping-power theory for heavy target atoms. *Phys. Rev. A*, 40(9), 5417—5419.
- 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—1112.
- Schneider D.P., Steig E., van Ommen T.D., Dixon D.A., Mayewski P., Jones J.M., Bitz C.M., 2006. Antarctic temperatures over the past two centuries from ice cores. *Geophys. Res. Lett.* 33, L16707. DOI:10.1029/2006GL027057.
- Slanger T.G., Jusinski L.E., Black G., Gadd G.E., 1988. A new laboratory source of ozone and its atmospheric implications. *Science* 241, 945—950.
- Spencer R.W., Braswell W.D., 1997. How Dry is the Tropical Free Troposphere? Implications for Global Warming Theory. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 78, 1097—1106.
- Steig E.J., Schneider D.P., Rutherford S.D., Mann M.E., Comiso J.C., Shindell D.T., 2009. Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year. *Nature* 457, 459—463. DOI:10.1038/nature07669.
- Stuber N., Sausen R., Ponater M., 2001. Stratosphere adjusted radiative forcing calculations in a comprehensive climate model. *Theor. Appl. Climatol.* 68, 125—135.
- Svensmark H., 1998. Influence of cosmic rays on Earth's climate. *Phys. Rev. Lett.* 81, 5027—5030.
- Svensmark H., Friis-Christensen E., 1997. Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage — a missing link in solar-climate relationships. *J. Atmos. Solar.-Terr. Phys.* 59, 1225—1232.
- Thompson D.W.J., Solomon S., 2002. Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change. *Science* 296, 895—899.
- Tinsley B.A., 1996. Solar wind modulation of the global electric circuit and apparent effects on cloud microphysics, latent heat release, and tropospheric dynamics. *Earth Planet. Space Geomag. Geoelectr.* 48(1), 165—175.
- Velinov P.I.Y., Asenovski S., Kudela K., Lastovicka J., Mateev L., Mishev A., Tonev P., 2013a. Impact of cosmic rays and solar energetic particles on the Earth's environment. *J. Space Weather Space Clim.* 3(A14), 1—17.
- Velinov P.I.Y., Asenovski S., Mateev L., 2013b. Numerical calculation of cosmic ray ionization rate profiles in the middle atmosphere and low ionosphere with relation to characteristic energy intervals. *Acta Geophys.* 61(2), 494—509.
- Vieira L.E.A., da Silva L.A., Guarnieri F.L., 2008. Are changes of the geomagnetic field intensity related to changes of the tropical Pacific sea-level pressure during the last 50 years? *J. Geophys. Res.* 113, A08226. DOI:10.1029/2008JA013052.
- Wang W.-Ch., Pinto J.P., Yunk Y.L., 1980. Climatic effect due to the halogenated compound in the Earth atmosphere. *Atmos. Sci.* 37, 333—338.
- 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.
- Wirth V., 1993. Quasi-stationary planetary waves in total ozone and their correlation with lower stratospheric temperature. *J. Geophys. Res.* 98, 8873—8882.
- Ziegler J.F., 1999. The stopping of energetic light ions in elemental matter. *J. Appl. Phys. Rev.* 85, 1249—1272.