

УДК 551.510535:550.338

О ПРИЧИНАХ ОХЛАЖДЕНИЯ И ОСЕДАНИЯ СРЕДНЕЙ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ

© 2022 г. Г. В. Гивишвили^а, *, Л. Н. Лещенко^а

^аИнститут земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова
РАН, Калужское шоссе, д. 4, Москва, Троицк, 108840 Россия

*e-mail: givi@izmiran.ru

Поступила в редакцию 20.12.2021 г.

После доработки 11.05.2022 г.

Принята к публикации 09.06.2022 г.

Показано, что сформулированная в 1999 г. концепция охлаждения и оседания средней и верхней атмосферы находит все новые экспериментальные подтверждения в разнообразных данных измерений параметров как нейтральной, так и ионизированной компоненты средней и верхней атмосферы. Вместе с тем, становится все более очевидным, что одним лишь увеличением содержания CO_2 в атмосфере невозможно объяснить весь спектр наблюдаемых долговременных трендов в атмосфере и ионосфере. Тем более, что основным источником поступления в атмосферу CO_2 служит сжигание углеводородного топлива в примышленных масштабах, связывающего свободный кислород с углеродом. С другой стороны, процессы, вызываемые уменьшением содержания O_2 в атмосфере, как ни странно, не рассматриваются ни в одной теоретической модели, призванной объяснить наблюдаемые явления. Между тем эффект резкого падения концентрации O_2 выше уровня турбопаузы отчетливо регистрируется по данным реакции ионосферы на солнечные вспышки.

Ключевые слова: тренды, атмосфера, ионосфера, кислород, углекислый газ, солнечные вспышки, модели

DOI: 10.31857/S0002351522050042

1. ПРЕДЫСТОРИЯ ВОПРОСА

Проблема охлаждения и оседания средней и верхней атмосферы возникла в конце XX столетия, и интенсивно обсуждается до сего дня. Первые свидетельства ее актуальности были получены в ходе изучения пространственной структуры ионосферного поглощения радиоволн, которое контролируется электронной концентрацией (N_e) в области D ионосферы. В свою очередь, она зависит от содержания атомарного кислорода и окиси азота на высотах 80–95 км. Эксперименты проводились в период пребывания НИС «Академик Курчатов» в Индийском океане с 20.03 по 26.06.1976. Они показали, что в течение всего периода нахождения НИС в акватории Персидского залива (21.05–6.06) величина поглощения в утренние часы была аномально низка, вплоть до нулевых значений при зенитном угле Солнца $\chi \geq 70^\circ$ и повышалась до нормальных, фоновых значений только к полудню — рис. 1. Эффект объяснялся нахождением НИС в зоне интенсивной нефтедобы-

чи и непрерывных выбросов в атмосферу больших масс поллютантов [1].

Первый прогноз реакции средней и верхней атмосферы на гипотетическое двукратное увеличение или уменьшение содержания CO_2 был представлен в модели [2]. Согласно ей, подобные гипотетические колебания $[\text{CO}_2]$ приводили к отклонениям содержания O_2 , O и N_2 от фоновых значений на ± 20 –50%, выше 90 км. Однако моделирование реакции ионосферы на столь сильные вариации содержания CO_2 , привел к выводу, что вариации ее ключевых характеристик — критических частот слоев f_oE ($h = 90$ –130 км) и f_oF2 ($h = 200$ –400 км) не должны были превышать погрешности измерений, и быть заметными только в высотах максимумов (hm) этих слоев: hmE должна была понизиться на 2,5 км, а $hmF2$ — на 17 км [3].

Экспериментальная проверка этих оценок, осуществленная на базе данных станций вертикального зондирования ионосферы (ВЗ) в Юлиусру, Пуатье и Слау за период с 1957 по 1990 гг. [4], подтвердила выводы [3]. Она не выявила каких-либо заметных изменений в частотах f_oE и f_oF2 , не связанных с циклическими вариациями солнечной активности и с геомагнитной возму-

Статья подготовлена на основе устного доклада, представленного на Всероссийской конференции «Собственное излучение, структура и динамика средней и верхней атмосферы» (Москва, 22–23 ноября 2021 г.).

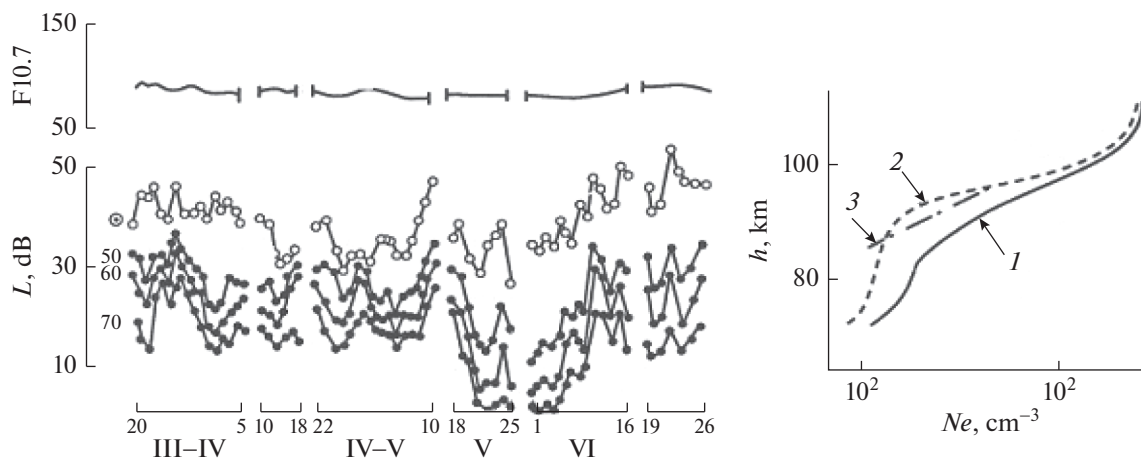


Рис. 1. На левой панели показаны величины поглощения L (в дБ) на частоте 2.8 МГц за период проведения измерений на НИС. Жирным точкам соответствуют L при допущенных зенитных углах Солнца $\chi = 50^\circ, 60^\circ$ и 70° , пустым кружочкам — L в полдень. На правой панели показаны значения N_e при $\chi = 60^\circ$: 1 — фоновые (полученные вне зоны Залива), 2 — аномальные. Кривая 3 соответствует ночным значениям N_e .

шенностью. Не обнаружила она и заметных изменений в параметре hmE , но засвидетельствовала понижение высоты $hmF2$ на ~ 8 км за 34 года мониторинга. Принимая во внимание, что за тот же период наблюдений концентрация CO_2 в атмосфере возросла лишь с 316 до 360 ppm, полученный вывод как будто подтвердил прогноз [2, 3].

Подход, предпринятый к изучению многолетних вариаций foE и $foF2$ на ст. Москва, не связанных с циклическими вариациями солнечной активности и с геомагнитной возмущенностью, напротив, обнаружил, что, во-первых, величины трендов в 3–5 раз превышают погрешности измерений, во-вторых, знак тренда $foF2$ меняется с се-

зоном: в период летнего солнцестояния он отрицателен, в равноденствие — положителен. В трендах foE никаких сезонных особенностей замечено не было [5].

Противоречия между выводами данной работы и результатами, предсказанными в работе [3], указывали на существование антропогенных факторов, не учтенных в работе [2], но влияющих на состояние ионосферы гораздо заметнее, нежели колебания $[CO_2]$. Проверка этого предположения была предпринята в работе [6]. Сравнивались многолетние тренды foE станций Москва ($\lambda = 37.5^\circ$ E), Свердловск ($\lambda = 58.6^\circ$ E), Томск ($\lambda = 84.9^\circ$ E), Алма-Ата ($\lambda = 76.9^\circ$ E) и уровни многолетних промышленных загрязнений приземных слоев воздуха в четырех регионах бывшего СССР: Европейская зона ($\lambda = 30\text{--}50^\circ$ E), Урал ($\lambda = 50\text{--}70^\circ$ E), Западная Сибирь ($\lambda = 70\text{--}100^\circ$ E), Средняя Азия ($\lambda = 50\text{--}80^\circ$ E) [7]. Была выявлена четкая корреляция между величинами трендов δfoE на указанных станциях и техногенным загрязнением природной среды в соответствующих им регионах — рис. 2.

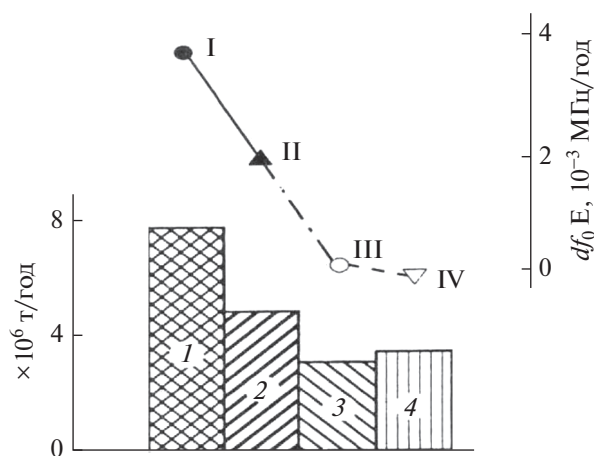


Рис. 2. Среднегодовые многолетние изменения foE : I — Москва, II — Свердловск, III — Томск, IV — Алма-Ата и суммарный выброс в атмосферу загрязнителей в отдельных регионах: 1 — Европейская зона, 2 — Урал, 3 — Западная Сибирь, 4 — Средняя Азия [7].

В работе [8] обсуждались каналы аэрономии, которые могли способствовать многолетнему росту foE в Москве. Было высказано предположение, что он, вероятнее всего, явился следствием падения $[O_2]$ на $\sim 60\%$ на высотах 110–120 км над Восточноевропейским регионом в период с 1945 по 1993 гг. А в работах [9, 10] впервые было заявлено о том, что климат верхней атмосферы и ионосферы действительно подвержен изменениям, связанным, в том числе, с антропогенной деятельностью.

Возникший интерес к данной проблематике среди отечественных и зарубежных специалистов

инициировал первое Международное рабочее совещание “Охлаждение и оседание средней и верхней атмосферы. Москва, 1998 г.”, посвященное обсуждению имевшихся у специалистов результатов длительных рядов наблюдений. Среди них особый интерес вызвали данные ракетных измерений температуры страто-мезосферы (Е.В. Лысенко); оценок трендов температуры мезопаузы и термосферы по эмиссиям гидроксила (R.P. Lowe), гидроксила и атомного кислорода (А.И. Семенов); радиофизическим методам (J. Taubenheim et al), (А. Ebel, U. Berger) и (Г.В. Гивишвили, Л.Н. Лещенко); трендам характеристик ветрового режима нижней термосферы (Ю.И. Портнягин и Е.Г. Мерзляков); оценок тренда общего содержания озона (Е.С. Казимировский и др) и высоты нижней ионосферы (Я. Лаштовичка): электронной концентрации в области D (А.Д. Данилов и Н.В. Смирнова), в слое F1 (Л.А. Щепкин и др.) и в слое F2 (А.В. Михайлов).

В выводах совещания подчеркивалось, что представленные результаты измерений свидетельствовали о существенных неизвестных ранее глобальных изменениях характеристик средней и верхней атмосферы, которые не были отражены ни в одной из известных эмпирических моделей (MSIS-90, CIRA-86, IRI-95) и не находили на тот момент адекватного объяснения [11]. Проблемы, озвученные в ходе Совещания, были столь неожиданны, что вызвали определенный скепсис в их достоверности у некоторой части исследователей.

Скептики посчитали концепцию “охлаждения и оседания средней и верхней атмосферы” ошибочной на том основании, что: а) данные по температурам в мезосфере, полученные из наблюдений атмосферных эмиссий и ракетных пусков, были признаны сильно завышенными; б) интерпретация трендов foE , якобы, была ложной, хотя сам знак тренда был указан правильно! Это дало основание [12] сформулировать альтернативную, “правильную” концепцию “охлаждения и оседания средней и верхней атмосферы”, которая без изменения названия стала “признанной мировой научной литературой” [13].

Однако, в конечном счете выяснилось, что выводы о трендах температуры в мезосфере, полученные ранее, верны. Результаты радиометрических измерений на спутнике TIMED за период 2002–2012 гг. показали, что отрицательный тренд температуры мезосферы составляет 3 К за десятилетие [14]. Ракетные измерения температуры для периода 1964–1988 гг. в средних и низких широтах свидетельствовали об отрицательном тренде температуры в пределах 6.5–3.5 К за декаду [15]. Всего лишь двукратная или даже меньшая разница в результатах может быть объяснима как несовпадением по времени между двумя циклами

измерений, так и различием методик. Так или иначе, она не критична и не принципиальна.

Что же касается объяснения тренда foE , до сих пор прежнее заключение [8] о том, что долговременный рост foE , обусловлен резким падением содержания молекулярного кислорода на высотах, превышающих уровень турбопаузы (104–106 км), не было опровергнуто. Расширение временного окна измерений методом ВЗ в Москве до 74 лет и развитие нового метода интерпретации данных [16], основанного на совместном анализе спутниковых измерений потока рентгеновского излучения во время вспышек на Солнце и данных ВЗ, позволили подтвердить высказанную гипотезу о ключевой роли $[O_2]$ в трендах характеристик слоя E ионосферы.

Таким образом, вывод обзора, посвященного результатам последнего (10-го) симпозиума по данной проблеме, констатировал следующее: “...проблема (и очень серьезная) заключается в том, что все расчеты в указанных (теоретических) моделях сделаны для случая удвоения количества CO_2 в атмосфере. Но на сегодня рост CO_2 , как уже указывалось выше, не достиг еще и 30%. А, следовательно, никакого количественного согласия нет — оседание атмосферы (в данном случае — уменьшение плотности) идет гораздо быстрее, чем дают “классические” модели. Это — первая из самых больших проблем всей ситуации с долговременными трендами в термосфере” [17]. Таким образом, во-первых все проводившиеся измерения нейтральных и заряженных компонент средней и верхней атмосферы в течение всего периода изучения проблемы повторяли, корректировали либо уточняли выявленные ранее знаки и величины трендов [11], а во-вторых проблема причины возникновения трендов далека от своего решения.

2. РЕАКЦИЯ foE НА СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ

2.1. Технология оценки реакции foE на вспышки

В качестве примера, поясняющего указанный метод оценки воздействия вспышки на foE рассмотрим событие, зарегистрированное на ст. Москва 26.10.2014 г. в ~11:00 UT. В данном случае интенсивность потока рентгеновского излучения в максимальной фазе вспышки возросла относительно фонового уровня на 2 порядка величины от 2×10^{-6} до 2×10^{-4} Вт m^{-2} . — рис. 3а. Реакция D - и E -областей ионосферы показана на рис. 3б.

Баланс ионизации в слое E описывается уравнением:

$$dNe/dt = q - \alpha Ne^2, \quad (1)$$

$$Ne = 1.24 \times 10^4 (foE)^2, \quad (2)$$

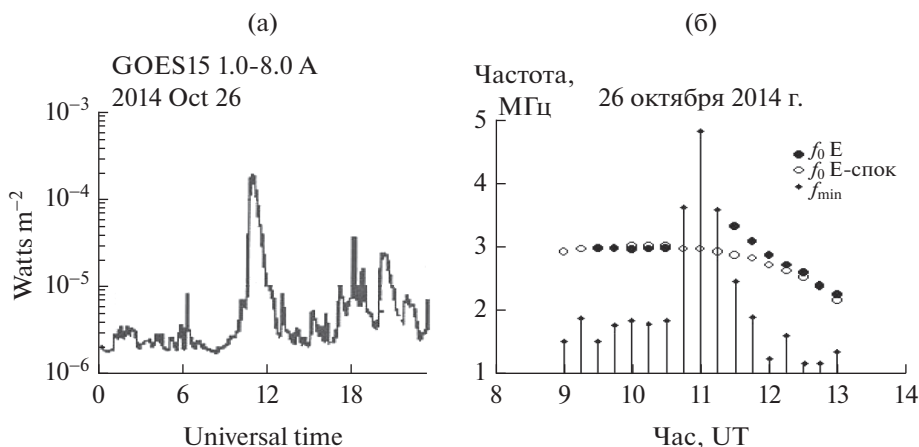


Рис. 3. Пример воздействия рентгеновской солнечной вспышки на E-слой ионосферы 26 октября 2014 г.: а — вариации потока рентгеновского излучения в диапазоне 1–8 Å (J_{1-8}); б — суточный ход foE по данным ст. Москва: заполненные кружочки — в день вспышки; пустые кружочки — в спокойных условиях. Ромбики — минимальная частота отражений f_{min} .

где α — эффективный коэффициент рекомбинации электронов, q — скорость ионообразования. Ионизация в слое E происходит, главным образом, благодаря солнечной радиации в двух спектральных диапазонах: ультрафиолетовом (977–1037 Å) и рентгеновском (8–165 Å), так что $q = q_u + q_x$, где индексы “u” и “x” означают ультрафиолетовое и рентгеновское излучение, соответственно. Рентгеновское излучение ионизирует все газовые компоненты верхней атмосферы, включая — N_2 , O_2 и O . Тем не менее, в невозмущенных условиях оно обеспечивает только 10–20% от общей ионизации слоя [16]. И основная роль в генезисе нормального слоя E принадлежит ультрафиолетовой радиации, взаимодействующей только с O_2 . При этом:

$$q_x/q_u = (q_x/q)/(1 - q_x/q), \quad (3)$$

$$q_x/q = \left\{ \left[foE^B / foE \right]^4 - 1 \right\} / \left\{ \left[J_{1-8}^B / J_{1-8} \right]^{0.25} - 1 \right\}, \quad (4)$$

где foE соответствует невозмущенным условиям, foE^B — моменту вспышки, J_{1-8}^B и J_{1-8} интенсивности рентгеновского излучения в диапазоне 1–8 Å во время вспышки и в спокойных условиях. (Так как $q_x/q_u \approx q_x/q$, соотношение скоростей ионизации рентгеновским и ультрафиолетовым излучением в дальнейшем будет отображаться в виде либо q_x/q_u , либо q_x/q).

Поскольку ультрафиолетовое излучение взаимодействует только с молекулярным кислородом, а рентгеновское — со всеми нейтральными компонентами атмосферы, отношение q_x/q или (q_x/q_u) характеризует газовый состав атмосферы на высотах слоя E в момент вспышки, фиксируя его нормальный для тех или иных гелиогеофизи-

ческих условий фон. Следовательно, располагая длительными рядами наблюдений q_x/q , можно судить не только о сезонных вариациях газового состава нижней термосферы, но также о его циклических и долговременных изменениях.

2.2. Массив данных измерений

Для определения широтно-долготных особенностей проявления эффекта многолетних вариаций отклика E-слоя на солнечные вспышки, данные ВЗ ст. Москва, полученные с 1969 по 1994 гг. были дополнены результатами измерений foE на сети 5 японских станций ВЗ (далее — Москва и Япония). Количество зарегистрированных вспышечных явлений, заметно менялось от одного пункта измерений к другому. В одних случаях это объяснялось техническими причинами, в других — степенью экранировки регулярного слоя E спорадическими слоями Es, в-третьих, различиями в долготе. Из-за этого моменты одних и тех же вспышек приходились: на одних станциях на светлое время суток, с достаточно хорошо развитым слоем E, а на других — на сумерки со слабо развитым слоем E. (По причине 8-ми часовой разницы в пояском времени между Москвой и Японией массив вспышек по данным японских станций практически не пересекается с рядами вспышек, зарегистрированных в Москве). Таким образом, всего было обработано 176 случаев солнечных рентгеновских вспышек в Москве и 361 — на станциях Японии. Когда на нескольких японских станциях одна и та же вспышка регистрировалась одновременно, найденные по ним значения q_x/q усреднялись. В результате к анализу привлечены 243 значения q_x/q .

2.3. Зависимость q_x/q от солнечной активности

На рис. 4 показаны результаты оценок параметра q_x/q в Москве (1969–2015 гг.) и Японии (1969–1994 гг.), рассчитанные по формуле (4). Из него видно, что, во-первых, в обоих регионах абсолютные значения отношения q_x/q близки друг другу. Во-вторых, общей особенностью в них является очевидная зависимость от солнечной активности (СА), которую можно выразить формулой:

$$q_x/q = (q_x/q)_0 + \delta F_{10.7}, \quad (5)$$

где $(q_x/q)_0$ относится к началу того или иного солнечного цикла, δ — коэффициент линейной зависимости q_x/q от $F_{10.7}$. При этом начальные значения q_x/q для каждого цикла СА — $(q_x/q)_0$ возрастают от цикла к циклу в обоих регионах. Этот факт указывает на наличие дополнительного фактора, помимо СА, влияющего на отношение $(q_x/q)_0$.

2.4. Зависимость q_x/q от сезона

Для анализа зависимости q_x/q от сезона их среднемесячные значения приводились к среднему уровню солнечной активности для всех случаев регистрации вспышек. Так как вспышечные явления редко наблюдаются в периоды низкой солнечной активности (рис. 3), этот уровень соответствовал $F_{10.7} = 170$. Анализ показал, что сезонные вариации $(q_x/q)_{170}$ как в Москве, так и в Японии не только близки друг другу, но, и это главное, они невелики — рис. 5. Исключение составляет аномально низкое значение $(q_x/q)_{170}$ в январе для Москвы. Это отклонение, вероятно, объясняется малым количеством регистрации вспышек, обусловленным особенностями развития зимнего слоя Е на широтах Москвы.

2.5. Широтная и долготная зависимости q_x/q

Чтобы исключить возможное влияние циклических вариаций на широтно-долготную структуру распределения параметра q_x/q , рассматривались данные измерений, соответствующие максимальной фазе одного цикла солнечной активности. Наиболее оптимальный в этом смысле период пришелся на четырехлетие (1979–1982 гг. со средним значением $F_{10.7} = 208$). Усредненные за 4 года наблюдений значения q_x/q на всех пунктах измерений показаны на рис. 6. Из него можно видеть, что тенденция к росту q_x/q с ростом широты выражена столь слабо, что не выходит за пределы $\pm 4.2\%$.

Так как на солнечное излучение в линиях 977 Å и 1026 Å реагирует исключительно O_2 , скорость ионизации q_u , обусловленная этим источником, так или иначе зависит от его концентрации, и q_u пропорционально ($\propto$) $[O_2]$. В то же время $q_x \propto$

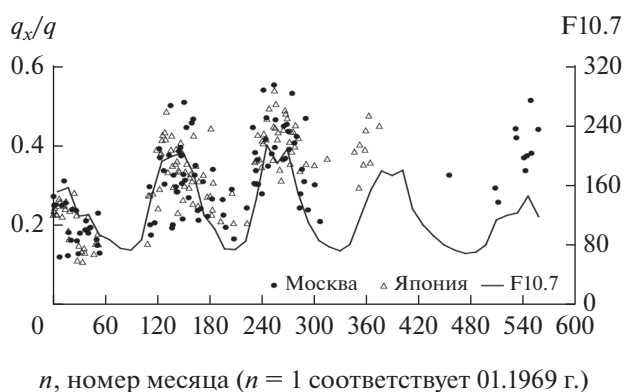


Рис. 4. Динамика изменений $(q_x/q)_0$: Москва (темные кружочки), Япония (светлые).

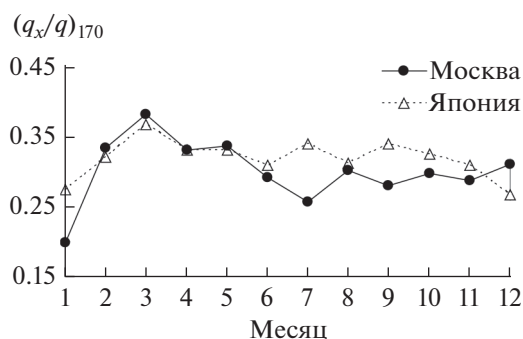


Рис. 5. Сезонные вариации отношения $(q_x/q)_{170}$: в Москве — темные кружочки, в Японии — светлые треугольники.

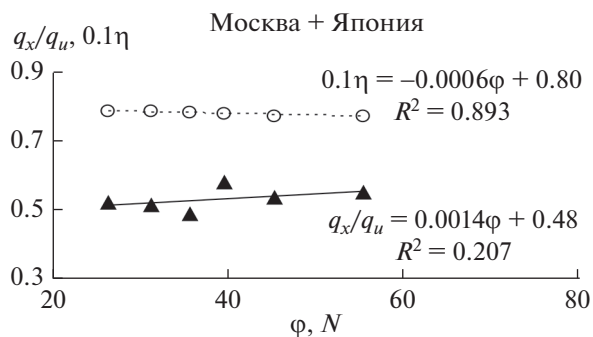


Рис. 6. Широтный ход экспериментальных значений q_x/q , усредненных по данным Москвы и Японии в период весеннего равноденствия — темные треугольники. Светлые кружочки — широтная зависимость величины 0.1η , определенного для высот 105–115 км 15 марта 1981 г. и координат станций из табл. 1 по модели MSIS [18].

$\propto \{[N_2] + [O_2] + [O]\}$, поскольку рентгеновское излучение взаимодействует со всеми атмосферными компонентами. Следовательно, $q_x/q_u \approx \approx q_x/q \propto \eta = \{[N_2] + [O_2] + [O]\}/[O_2]$, и таким образом $q_x/q \propto \eta$. Отношение η для тех или иных ге-

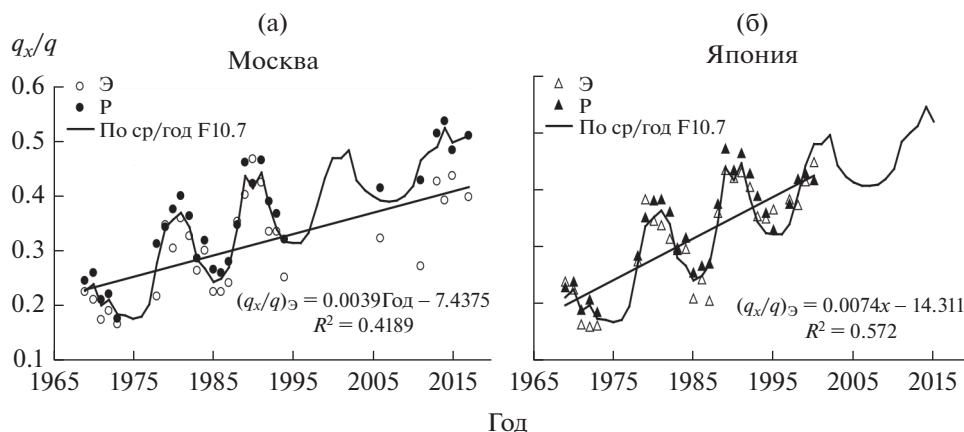


Рис. 7. Экспериментальные значения q_x/q (светлые фигуры), расчетные (темные фигуры), найденные по формулам (6,7): а — для Москвы, б — для Японии. Сплошные кривые — общие для обоих регионов, рассчитана по формуле (6). Сплошные прямые — линейные тренды экспериментальных значений $(q_x/q)_Э$ в обоих регионах.

лиогеофизических условий находится из эмпирических моделей атмосферы, подобных, в частности, модели MSIS [18].

Согласно модели MSIS [18] широтный ход величины 0.1η в пределах указанных границ также мало заметен. Следовательно, нет причин ожидать обнаружения каких-либо заметных особенностей и в пространственном распределении параметра η . Кроме того, как эмпирические q_x/q , так и модельные значения 0.1η не обнаруживают и значимых долготных эффектов. Для регионов, отстоящих друг от друга на 8 часовых поясов, многолетние вариации отношения $(q_x/q)_{170}$ практически одинаковы.

2.6. Общая оценка многолетнего тренда q_x/q

Так как отношение q_x/q лишь в малой степени зависит от сезона, а также от координат пункта наблюдения, но коррелирует с солнечной активностью и возрастает от цикла к циклу СА, общую динамику многолетней изменчивости среднегодовых значений q_x/q можно описать выражением, определенным по данным наблюдений в период с 1969 по 1994 гг. формулами — для Москвы:

$$(q_x/q)_М(t) = 0.068 \times \text{Год} + 0.0012F_{10.7} - 13.343, \quad (6)$$

и для Японии:

$$(q_x/q)_Я(t) = 0.0076 \times \text{Год} + 0.0012F_{10.7} - 14.934, \quad (7)$$

где “Год” отсчитывается с 1969.

На рис. 7 (а, б) представлены временные вариации экспериментальных (среднегодовых) отношений $(q_x/q)_Э$, и их расчетные оценки $(q_x/q)_Р$, найденные по формулам (6, 7). Как можно видеть из рис. 7б, в Японии имело почти полное совпадение значений $(q_x/q)_Э$ и $(q_x/q)_Р$. В Москве после 2003 г. расхождение между экспериментальными и расчетными значениями q_x/q было довольно ве-

лико. Это может объясняться двумя причинами. Во-первых, заметным снижением солнечной активности и крайне редкими случаями наблюдений всплеск. Во-вторых, возможным изменением спектра ионизирующего излучения Солнца, сопровождающим общее падение его активности, наблюдающееся в 23 и 24 циклах. Так или иначе, вопрос остается открытым.

Сходство значений $(q_x/q)_Р$, определенных по среднегодовым значениям $F_{10.7}$ для Москвы и Японии позволяет представить обобщенную формулу многолетнего тренда q_x/q , характеризующего общую динамику изменчивости этого параметра. В пределах средних широт северного полушария она принимает вид:

$$q_x/q(t) = 0.0072 \times \text{Год} + 0.0012F_{10.7} - 14.139. \quad (8)$$

3. ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ВЫВОДА О РЕЗКОМ ПАДЕНИИ СОДЕРЖАНИЯ O_2 В НИЖНЕЙ ТЕРМОСФЕРЕ, ПРОИСХОДЯЩИМ В ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ

Результаты расширения временного диапазона измерений и включения в них данных высоты максимума слоя E (фактически — действующей высоты $h'E$), представлены на рис. 8 среднегодовых значениями $h'E$ и $(foE)_{123}$, приведенными к среднему за весь рассматриваемый период значению $F_{10.7} = 123$. (Разрывы в данных $h'E$ обусловлены не только техническими причинами, но также условиями их архивации. Для удобства сопоставления вариаций $h'E$ и $(foE)_{123}$, последние также показаны фрагментарно).

Из него можно видеть, что в целом за 74 лет наблюдений линейный тренд среднегодовой частоты $(foE)_{123}$ был положителен, но мал, составив $+1.13 \times 10^{-3}$ МГц/год. В конечном счете это привело к увеличению $(foE)_{123}$ не более, чем на

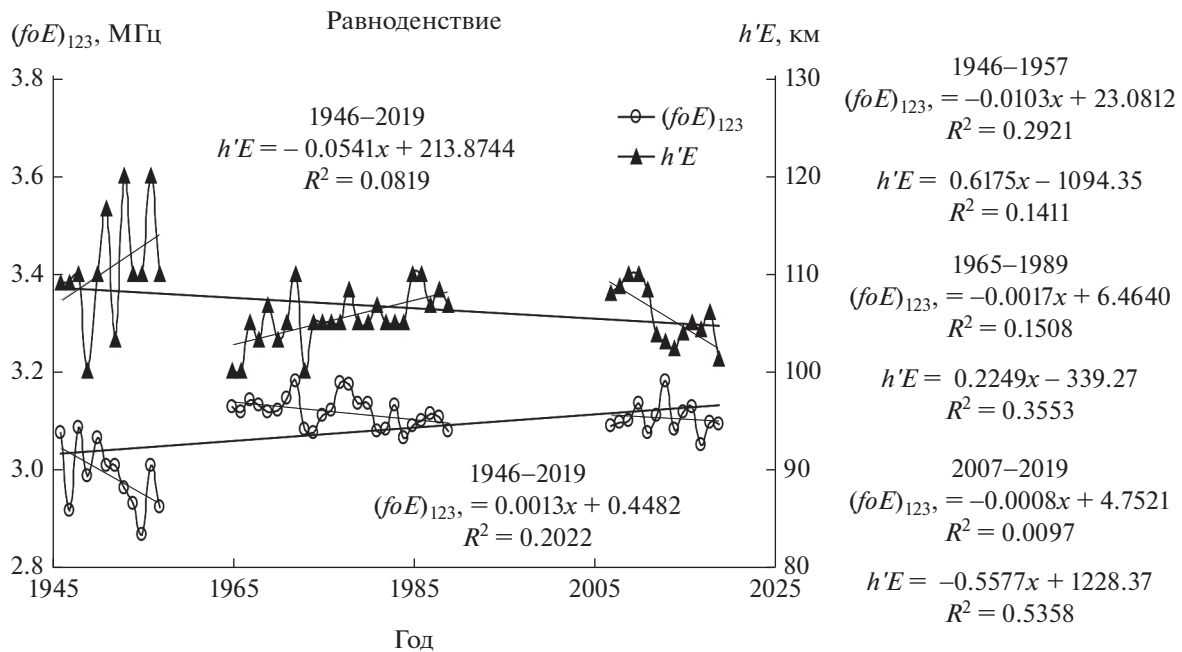


Рис. 8. Межгодовые вариации среднегодовых значений $(foE)_{123}$ и $h'E$, а также их линейные тренды для трех временных периодов и в целом для всего периода наблюдений 1946–2017 гг.

0.1 МГц. Тогда как понижение $h'E$ (соответственно hmE) составило 3.5 км.

Чтобы уточнить реальную скорость убыли кислорода в верхней атмосфере, необходимо уточнить механизмы, формирующие высотный профиль электронной концентрации. В квази-равновесных условиях, в течение 2–4 часов вблизи локального полудня из уравнения (1) следует:

$$Ne = (q/\alpha)^{0.5}. \quad (9)$$

Спутниковые измерения потоков рентгеновского излучения начались в 1969 г. За период с 1969 г. по 2017 гг. частота $(foE)_{123}$ выросла с 3.12 до 3.21 МГц, а $h'E$ понизилась на ~3.5 км: с 108.5 до 105.0 км. Это равнозначно понижению hmE с 116.5 км до 113 км. Данные о динамике Ne , $(foE)_{123}$ и hmE за этот временной интервал приведены в табл. 1 (столбцы 1 и 2).

Для расчетов Ne и, соответственно, foE , hmE из выражения (9) необходимо рассчитать высотные профили скорости ионообразования q для основных ионизируемых компонент — N_2 , O_2 и O . Расчеты производились по формулам:

$$q_u(h) = \sigma_i[O_2]J_u \exp\left\{-2\sigma_\alpha \int_{90}^{\infty} [O_2]dh \text{Ch}(R, \chi)\right\}, \quad (10)$$

$$q_x(h) = \sigma_i[X]J_x \exp\left[-2\sigma_\alpha \int_{90}^{\infty} [X]dh \text{Ch}(R, \chi)\right], \quad (11)$$

где $X = O, O_2, N_2$; σ_i, σ_α — сечения их ионизации и поглощения, соответственно; $\text{Ch}(R, \chi)$ — функция Чепмена.

Сведения об интенсивности потоков ионизирующего излучения J_u и J_x [$\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$], а также о соответствующих сечениях ионизации и поглощения взяты из [19, 20]. Согласно данным лабораторных измерений [21] эффективная скорость потерь электронов α в реакциях рекомбинации с

Таблица 1. Экспериментальные и расчетные значения характеристик слоя E-ионосферы

Параметр	Эксперимент		Расчеты MSIS*	Расчеты MSIS**
	1	2	3	4
	1969	2017	1969	2017
$Ne, \text{см}^{-3}$	1.2(5)	1.3(5)	1.24(5)	1.43(5)
$(foE)_{123}, \text{МГц}$	3.12	3.21	3.16	3.4
$hmE, \text{км}$	116.5	113	116.5	111.5
$q, \text{см}^{-3} \text{с}^{-1}$	5.4(3)	6.6(3)	5.8(3)	7.8
$(q_x/q)_{170}$	0.22	0.44	0.31	0.45

Примечание. * Интенсивность потока J_{977} увеличена в 3 раза, а J_{1026} — в 2 раза. ** концентрация O_2 на высоте 110 км уменьшена в 3.9 раза.

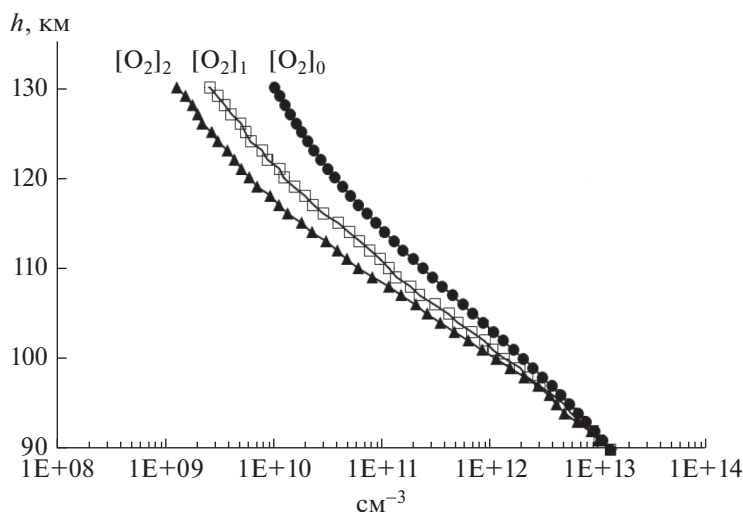


Рис. 9. Варианты высотных профилей $[O_2]$: $[O_2]_0$ — из модели MSIS, $[O_2]_1$ — уменьшенная на высоте 110 км в 2.1 раза, $[O_2]_2$ — в 3.9 раза.

ионами NO^+ и O_2^+ , преобладающими на высотах области E определяется уравнениями:

$$\alpha_{NO^+} = 4.1 \times 10^{-7} (300/T)^{0.5} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}, \quad (12)$$

$$\alpha_{O_2^+} = 2.2 \times 10^{-7} (300/T)^{0.5} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}, \quad (13)$$

так что

$$\alpha = \alpha_{O_2^+} \{1 + 2\phi^+ / (1 + \phi^+)\}, \quad (14)$$

где $\phi^+ = [NO^+]/[O_2^+]$.

Для согласования расчетных значений $(foE)_{123}$, NmE , hmE , q и $(q_x/q)_{170}$ для 1969 г. с экспериментальными (столбец 1), мы вынуждены были искусственно повысить интенсивность потоков излучения в линии $977 \text{ \AA}$ в 3 раза, а в линии $1026 \text{ \AA}$ в 2 раза. С учетом этого обстоятельства и согласно модели MSIS, результаты расчетов по формулам (9–14) представлены в столбце 3. Однако получить приемлемое согласование результатов расчетов с экспериментальными данными для 2017 года (столбец 2) не удавалось до тех пор, пока содержание O_2 из модели MSIS не было уменьшено на высоте 110 км в 2.1 раз — $[O_2]_1$ и в 3.9 раз — $[O_2]_2$ (столбец 4). Только в этом случае высота максимума слоя опустилась на требуемые 3.5 км. Высотные профили $[O_2]$, использованные в расчетах, представлены на рис. 9.

Почти двукратный рост qx/q , произошедший за 45 лет наблюдений, не может не быть связан с существенным изменением структуры основных газовых составляющих нижней термосферы. И, прежде всего, с более, чем двукратным падением концентрации O_2 вблизи высоты максимума слоя E .

Таким образом, привлечение данных рентгеновского излучения во время вспышечных явлений к данным вертикального зондирования подтвердил прежний вывод о доминантной роли $[O_2]$ в многолетних трендах слоя E [8].

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Со времени 1-го Симпозиума в рамках КОСПАР, посвященного трендам (Прага, 2001), до настоящего времени акцент делается на том, что охлаждение и оседание средней и верхней атмосферы объясняется увеличением в атмосферном газе количества CO_2 вследствие роста добычи углеродосодержащего водородного топлива и его переноса из тропосферы механизмом турбулентного перемешивания. Вывод этот мог бы показаться тривиальным, если бы не одно большое возражение. Общепринятая концепция основана на гипотезе о двукратном увеличении содержания CO_2 в атмосфере [2], которая прогнозирует весьма слабые отклики в нейтральной средней и верхней атмосфере и ионосфере. Между тем, за последние примерно 30 лет рост количества CO_2 едва достиг 25–30%, тогда как реальные тренды в атмосфере и ионосфере на порядки величины превышают их прогностические оценки. Кроме того, в явлении многолетних трендов выявилось множество новых, нерешенных проблем, возникших в ходе их исследования. Решения некоторых из них даются ниже.

Вопрос 1: каков источник резкого уменьшения $[O_2]$ вблизи максимума слоя E ?

Ответ: по данным (<https://ru-ecology.info/term/20061/>) в настоящее время “ежегодно в мире сжигается более 9 млрд т условного топлива, что при-



Рис. 10. Среднегодовые значения $(foE)_{123}$ по данным станций ВЗ, а также суммарные годовые запуски спутников (https://ru.wikipedia.org/wiki/Список_космических_запусков) и наземно-атмосферные ядерные испытания, осуществленные в мире (Gallery of U.S. Nuclear Tests; <https://ria.ru/20130212/922464642.html>).

водит к выбросу в окружающую среду более 20 млрд т диоксида углерода (CO_2) и более 700 млн т других соединений”. В результате реакции полного сгорания топлива, которое описывается уравнением:



техногенное увеличение массы CO_2 в атмосфере должно сопровождаться эквивалентным уменьшением массы O_2 . Полное число молекул O_2 в столбе единичного сечения оценивается как $[O_2]H_{O_2}$, где H_{O_2} — шкала высот O_2 . Площадь земной поверхности $S = 5.1 \cdot 10^{18} \text{ см}^2$. Отсюда следует, что полное число молекул O_2 в атмосфере $\Sigma O_2 = [O_2]H_{O_2} S = 2.510^{43}$ частиц, или 1.34×10^{15} тонн. На высоте 100 км в субтропических и средних широтах среднегодовое значение $[O_2]H_{O_2} = 1.85 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Если за 25 лет наблюдений $[O_2]H_{O_2}$ на высотах $h \geq 100 \text{ км}$ понизилась в 2.5 раза, до $0.7 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$ [МСИС], то убыль полного числа O_2 в столбе единичного сечения составляла $\Delta = (1.85 - 0.7) = 1.1 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$, т.е. происходила со скоростью $4.4 \times 10^{16} \text{ см}^{-2} \text{ год}^{-1}$. Это эквивалентно среднегодовому уменьшению общего содержания кислорода в атмосфере на рубеже XX–XXI вв. со скоростью $1.3 \times 10^7 \text{ т/год}$, или $\sim 10^{-8} \Sigma M_O/\text{год}$.

Ни один существующий прибор или датчик не обладает чувствительностью, способной обнаружить подобные изменения содержания кислорода до тех пор, пока в атмосфере происходит полное перемешивание газовых составляющих. Ситуация меняется лишь на высотах: а) превышающих уровень

турбопаузы (104–107 км), б) где плотность атмосферы на 6–7 порядков ниже приземной. Поэтому только метод ВЗ в совокупности с данными спутниковой регистрации потоков рентгеновского излучения способен, как выясняется, контролировать многолетнюю динамику изменчивости содержания O_2 в атмосфере в целом.

Вопрос 2: почему столь сильное уменьшение $[O_2]$ не подтверждается спутниковыми данными измерений состава и оценками интенсивности атмосферных эмиссий?

Ответ: дело в том, что высоты, на которых фиксируют свечение атмосферы в полосах Герцберга (молекулярный кислород) и зеленой линии (атомарный кислород), а также гидроксила, происходит на высотах 80–95 км [22]. Диапазон высот, на которых спутники регистрируют содержание CO_2 , составляет 90–105 км [23, 24]. Иначе говоря, все “маркеры”, по которым можно судить о долговременных изменениях состава атмосферы, находятся в зоне интенсивного турбулентного перемешивания. Кроме того, на этих высотах концентрация OH на 5, а CO_2 — на 3 порядка величины ниже $[O_2]$. Поэтому относительные изменения в процентах, регистрируемые при их мониторинге, оказываются гораздо более ощутимы, чем молекулярного кислорода при примерно равных абсолютных величинах роста $[OH]$, $[CO_2]$ и убыли $[O_2]$ (уравнение 15). А среднее многолетнее содержание атомарного кислорода на высотах 90–110 км в течение периода с 1955 по 1995 гг. мало изменялось, в основном за счет опускания нижней границы слоя на $\sim 3 \text{ км}$ за 40 лет [25].

Таблица 2. Тренды $y = (foE)_{123}$ в двух временных окнах. Жирным шрифтом выделены статистически значимые коэффициенты

Станции	1946–1957	1958–1986
Слау: N = 52.2; E = 0.5	$y = -\mathbf{0.012}$ МГц/год $\times$ год + 27.256; $R^2 = \mathbf{0.644}$	$y = -1E(-05)$ МГц/год $\times$ год + 3.204; $R^2 = 4E(-06)$
Москва: N = 55.5; E = 37.5	$y = -\mathbf{0.015}$ МГц/год $\times$ год + 32.293; $R^2 = \mathbf{0.603}$	$y = 0.0017$ МГц/год $\times$ год – 0.256; $R^2 = 0.111$
Свердловск: N = 56.5; E = 58.6	$y = -\mathbf{0.013}$ МГц/год $\times$ год + 28.772; $R^2 = \mathbf{0.463}$	$y = 0.0015$ МГц/год $\times$ год + 0.099; $R^2 = 0.04$
Томск: N = 56.5; E = 84.9	$y = -\mathbf{0.017}$ МГц/год $\times$ год + 35.666; $R^2 = \mathbf{0.441}$	$y = 0.0017$ МГц/год $\times$ год – 0.393; $R^2 = 0.1254$

Вопрос 3: когда и в связи с чем техногенная деятельность оказалась “спусковым крючком” для возникновения трендов в ионосфере?

Ответ: в работе [26] рассматривались долготные эффекты трендов foE , и была выявлена бросающаяся в глаза особенность, радикально отличающая периоды до и после 1957–58 гг. На рис. 10 представлены среднегодовые значения $(foE)_{123}$, приведенные к $F = 123$ для станций Слау, Москва, Свердловск, Томск, а также их линейные тренды для вышеотмеченных периодов.

Представление об изменении характера трендов $(foE)_{123}$ на них, перекрывающих долготный диапазон в $\sim 85^\circ$, дает табл. 2. Из нее можно видеть, что до 1957 г. падение $(foE)_{123}$ на различных станциях происходило синхронно, его темп был велик, значим ($R^2 = 0.441$ – 0.644) и почти одинаков (линейная скорость варьировала в пределах 0.012 – 0.017 МГц/год). Совершенно иной характер приобрели долговременные изменения $(foE)_{123}$ после 1958 г. Во-первых, тренд изменил знак на положительный, во-вторых, его скорость упала на

один – два порядка величины и стала незначимой. В Слау тренд практически исчез.

Кроме того, как можно видеть из табл. 3, коэффициент корреляции между трендами $(foE)_{123}$ на станциях, отстоящих друг от друга до 6.5 тыс. км по долготе, до 1957 г. не опускался ниже ~ 0.7 . После 1958 г. заметная корреляция между изменениями $(foE)_{123}$ осталась лишь для сравнительно близко расположенных пар станций: Слау–Москва и Свердловск–Томск. (Необъяснимое исключение составляет пара Москва–Томск). Таким образом, данные измерений показывают, что до 1957 г. тренд $(foE)_{123}$ определялся глобальным фактором, после 1958 г. стали преобладать локальные источники тренда.

На изменение знака тренда критических частот foE и $foF2$ в 50-х годах прошлого столетия первыми обратили внимание авторы [27]. На основе анализа данных ВЗ шести среднеширотных станций мира с 1933 по 1973 гг. они высказали предположение, что солнечную активность, контролирующую foE и $foF2$, характеризуют не только числа солнечных пятен (Rz) или индекс $F_{10.7}$, но и радиация, которая определяется эффективной площадью флоккул (facular area). Учет влияния излучения от флоккул (A_F) оценивался авторами регрессионным уравнением вида:

$$foE = 2.83 + 3.45 \times 10^{-3} Rz + 6.7 \times 10^{-5} A_F.$$

Возможно, данное соотношение справедливо, поскольку, как видно из табл. 2, уменьшение $(foE)_{123}$ носило если не глобальный, то определенно – региональный характер. Тем не менее, данное выражение удовлетворительно описывало зависимость foE от параметра A_F лишь до 1957–58 гг., как можно судить по данным не только Слау, но и других, рассмотренных выше станций (рис. 10, табл. 2). В 1958 г. произошла смена знака: с отри-

Таблица 3. R – коэффициенты корреляции среднегодовых значений $(foE)_{123}$ на станциях Евразийского региона в двух временных диапазонах

Станции	1946–1957	1958–1986
Слау–Москва	0.901	0.488
Слау–Свердловск	0.857	0.012
Слау–Томск	0.811	0.324
Москва–Свердловск	0.689	0.099
Москва–Томск	0.791	0.543
Свердловск–Томск	0.856	0.566
Среднее	0.818	0.339

Таблица 4. Корреляции среднегодовых значений $(foE)_{123}$ с A_F на станциях Евразийского региона в трех временных диапазонах

Периоды	Алма–Ата	Слау	Москва	Свердлов.	Томск
1946–1957	0.747	0.683	0.795	0.664	0.686
1958–1967	–0.030	–0.437	0.829	–0.343	0.552
1946–1967	–0.130	0.098	0.738	–0.158	0.640

цательного тренда на положительный. О радикальном изменении характера трендов свидетельствуют и данные табл. 4, в которой представлены коэффициенты связи между вариациями излучения от флоккулов и $(foE)_{123}$ на всех рассмотренных станциях в трех временных окнах.

Что могло так резко изменить характер тренда $(foE)_{123}$ с переменой его знака практически во всем Евразийском регионе? Вероятный ключ к разгадке связан с тем фактом, что 1957–1958 гг. дали старт массовым наземно-воздушным испытаниям ядерных вооружений, а также стремительному росту запусков баллистических ракет и спутников – рис. 10. Особенно впечатляют временные совпадения между пиками ядерных испытаний и динамикой $(foE)_{123}$. Первый пик испытаний 1958 г. сопровождался изменением знака тренда $(foE)_{123}$, а в 1962 гг. совпали оба пика, как ядерных испытаний, так и тренда $(foE)_{123}$. Сомнительно, чтобы такие синхронизированные параллели были случайны. Более вероятно, что внезапные массивированные возмущения тропосферы и стратосферы, вызванные частыми ядерными испытаниями и запусками ракетно-космической техники, сыграли роль катализатора возмущений в средней и верхней атмосфере и ионосфере.

На то, что вектор возмущений направлен снизу вверх, указывают следующие факты. Большинство ракет, доставляющих те или иные изделия на космические орбиты, оснащены жидкостными двигателями. В качестве топлива они используют, как правило, керосин, гидразин и аммиак, а также кислород с фтором в качестве окислителей. В процессе старта каждая ракета выбрасывает в нижние слои атмосферы тонны O_2 , H_2 , C_2 , N_2 , F_2 . Заметная их доля затем достигает высот термосферы. Вместе с тем, как при наземных, так и при воздушных ядерных испытаниях в атмосферу инжектируются массы радиоактивных аэрозолей и изотопов десятков различных элементов. А ударная волна, распространяясь на сотни и тысячи километров по горизонтали, также способствует скачкообразному росту интенсивности турбулентности и заносу мезосферного воздуха на высоты термосферы.

Следовательно, “волна” возмущений в нейтральной атмосфере, направленная снизу вверх, должна проявиться в ионосфере с некоторым за-

паздыванием: с переходом от слоя E (90–130 км) к слою F2 (200–400 км). Эффект запаздывания проявился в том, что до 1957 г. слой E контролировался не только параметром R_z , но и, в меньшей степени, параметром A_F . После 1958 г. излучение от флоккулов перестало играть какую-либо роль в ионизации слоя E. В слое F2, напротив, влияние излучения от флоккулов сохранялось, как минимум, до начала 1970-х годов. На рис. 11 по данным [26] представлены данные измерений частоты $(foF2)_{100}$ с конца 1950-х до начала 1970-х гг. на 6 станциях ВЗ северного и южного полушария, приведенные к $R_z = 100$. Они свидетельствуют о высокой степени корреляции $(foF2)_{100}$ с интенсивностью излучения от флоккулов (табл. 5) в течение всего периода регистрации параметра A_F . Данные измерений в Миллстон Хилле и Сен-Сантин уточняют время достижения возмущений высот слоя F2. Согласно [28] это произошло около 1980 г. Отсюда следует, что расстояние, примерно равное 250 км, возмущения преодолели за ~20 лет. Таким образом, скорость их вертикального переноса составляла ~12.5 км/год.

Отсюда можно сделать вывод, что антропогенная деятельность оставляет свои следы в средней и верхней атмосфере, по меньшей мере, с начала промышленной добычи нефти (1940–50-е гг.), а в ионосфере проявилась прежде всего в области D (высоты 70–90 км). К 1957–1958 гг. ее граница переместилась на высоты слоя E и только к концу 1970-х годов достигла слоя F2.

Таблица 5. Корреляции среднегодовых значений $(foF2)_{100}$, нормированных к $R_z = 100$, с facular area

№	Станции	R
1	Чёрчилль: 56 N, 38 W	0.864
2	Слау: 52 N, 0.5 W	0.972
3	Вашингтон: 39 N, 77 W	0.928
4	Токио: 36 N, 140 E	0.722
5	Крайстчёрч: 44 S, 173 E	0.735
6	Порт Стэнли: 52 S, 57 W	0.900

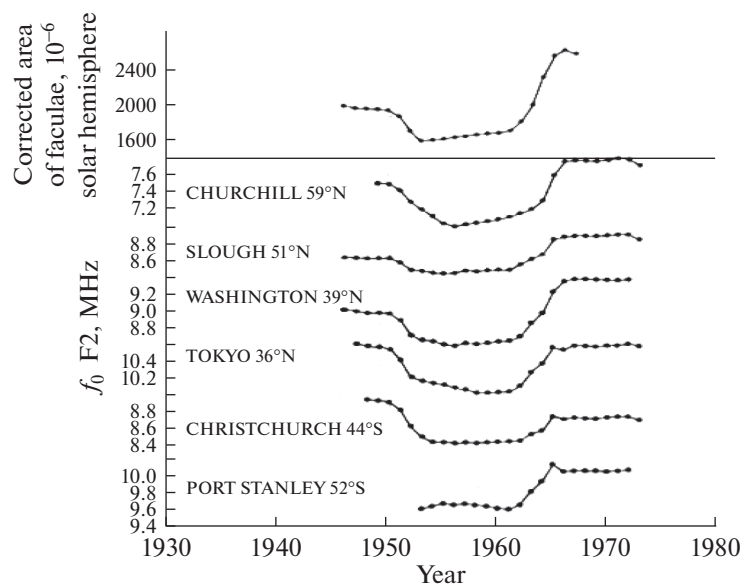


Рис. 11. Вариации эффективной площади флоккул (верхняя секция) и скользящей средней за 11-летний период наблюдений полуденной критической частоты F_2 -слоя, нормализованной к $R_z = 100$ на различных станциях ВЗ. [27].

Вопрос 4: почему на фоне глобальных трендов характеристик атмосферы и ионосферы необъяснимо сильны их локальные эффекты?

Ответ: как видно из рис. 11 и табл. 2–4, пространственно-временная структура трендов $(foE)^*$ и hmE в Евразийском регионе приобрела нерегулярный характер после 1958 г. Представляется очевидным, что одной из наиболее вероятной причин усложнения и хаотизации глобальной картины трендов $(foE)^*$ и hmE стало воздействие антропогенной деятельности на средние и верхние слои атмосферы. Полигоны, на которых проводились ядерные испытания в прошлом, а в настоящее время производятся запуски спутников, а также регионы интенсивной добычи ископаемого углеродного топлива, работы транспорта, промышленного и аграрного производства, загрязняющего природную среду, распределены по земной поверхности весьма неоднородно. Однако совокупное действие этих факторов приводит, с одной стороны, к интегральному эффекту, который интерпретируется как “охлаждение и оседание средней и верхней атмосферы”; с другой — способствует усилению пространственно-временной хаотизации многолетней изменчивости параметров всех слоев атмосферы и ионосферы, не связанной с вековым ходом солнечной активности.

Вопрос 5: почему интенсивность эффектов, наблюдаемых в атмосфере и ионосфере, многократно превышает прогнозы [2] и [3]?

Ответ: по всей видимости потому, что мы еще далеки от понимания всех связей и процессов,

формирующих верхние слои атмосферы и ионосферу.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ состояния дел в проблеме долговременных трендов позволяет сделать следующие важные выводы:

1. Концепция охлаждения и оседания средней и верхней атмосферы, впервые была сформулирована в [11].
2. Новые экспериментальные данные, во-первых, подтверждают и в ряде случаев уточняют, но не опровергают выводы, сделанные ранее в [11], во-вторых, резко противоречат прогностическим оценкам, основанным на гипотезе [2].
3. Совместный анализ солнечного рентгеновского излучения и наземного радиозондирования ионосферы подтверждает факт практически незаметного уменьшения содержания O_2 в атмосфере вплоть до уровня турбопаузы, но скачкообразного роста скорости его падения выше этой границы.
4. Совокупность фактов, накопленных к настоящему времени, свидетельствует о том, что антропогенное влияние на атмосферу гораздо сложнее, чем представляется адептам идеи CO_2 как основном “возмутителе ее спокойствия”.
5. Предложена гипотеза еще об одном, дополнительном факторе, возмущающем динамику, химический состав и аэрономию средней и верхней атмосферы, связанным с начавшимися в 1957–1958 гг. массированными ядерными (наземными)

и воздушными) испытаниями, а также запусками баллистических ракет и спутников.

6. Состояние дел на сегодняшний день таково, что проблема трендов только поставлена. Для ее решения предстоит рассмотреть и изучить еще множество механизмов (включая различные антропогенные факторы), влияющих на состояние земной атмосферы в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Givishvili G.V. and Leshchenko L.N.* D region depletions about the Persian Gulf // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1993. V. 55. № 1. P. 125–128.
2. *Roble R.G. and Dickinson R.E.* How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and thermosphere? // *Geophys. Res. Lett.* 1989. 16. 1441–1444.
3. *Rishbeth H.* A greenhouse effect in the ionosphere? // *Planet. Space Sci.* 1990. 38. 945–948.
4. *Bremer J.* Ionospheric trends in mid-latitude as a possible indicator of the atmospheric greenhouse effect // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1992. 54. 1505–1511.
5. *Гвишвили Г.В., Лещенко Л.Н.* Долговременные тренды свойств ионосферы и термосферы средних широт // Доклады АН. 1993. Т. 333. № 1. С. 86–89.
6. *Гвишвили Г.В., Лещенко Л.Н.* Возможное доказательство наличия техногенного воздействия на среднеширотную ионосферу // Доклады АН. 1994. Т. 334. № 2. С. 213–214.
7. *Фешбах М., Френдли-младший А.* Экоцид в СССР. 1993.
8. *Гвишвили Г.В., Лещенко Л.Н.* Динамика климатического тренда среднеширотной области Е ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 1995. Т. 35. № 3. С. 166–174.
9. *Givishvili G.V. and L.N. Leshchenko, Shmeleva O.P. and Ivanidze T.G.* Climatic trends of the mid-latitude upper atmosphere and ionosphere // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1995. V. 57. № 8. P. 871–874.
10. *Гвишвили Г.В., Лещенко Л.Н., Лысенко Е.В., Перов С.П., Семенов А.И., Сергеев Н.П., Фишкова Л.М., Шефов Н.Н.* Многолетние тренды некоторых характеристик земной атмосферы. Результаты измерений // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 1996. Т. 32. № 3. С. 329–339.
11. *Гвишвили Г.В., Голицын Г.С.* О Международном рабочем совещании “Охлаждение и оседание средней и верхней атмосферы” (Москва, 6–10 июля 1998 г.) // Геомагнетизм и аэрономия. 1999. Т. 39. № 3. С. 139–144.
12. *Lastovicka J., Akmaev R.A., Beig G. et al.* Emerging pattern global change in the upper atmosphere and ionosphere // *Ann. Geophysicae.* 2008. V. 26 № 5. P. 1255–1268.
13. *Данилов А.Д.* Долговременные тренды в верхней атмосфере и ионосфере (Обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. 2012. Т. 52. № 3. С. 291–312.
14. *Beig G.* Trends in temperature of the mesosphere and its linkages with stratosphere // Paper presented at the 10th Workshop on Long-term Changes and Trends in the Atmosphere (Hefei, China, May 14–18, 2018)
15. *Кокин Г.А., Лысенко Е.В., Розенфельд С.Х.* Изменения температуры страто- и мезосферы в период 1964–1988 гг. по данным ракетного зондирования // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. Т. 26. № 7. С. 702–710. 1990.
16. *Иванов-Холодный Г.С., Лещенко Л.Н., Одинцова И.Н.* Соотношение рентгеновского и ультрафиолетового излучений солнечных вспышек в ионизации Е-области ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 1976. Т. 16. № 2. С. 246–250.
17. *Данилов А.Д., Константинова А.В.* Долговременные вариации параметров средней и верхней атмосферы и ионосферы (Обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. 2020. Т. 60. № 4. С. 411–435.
18. *Hedin A.E.* Extension of the MSIS thermospheric model into the middle and lower atmosphere // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. P. 1159.
19. *Иванов-Холодный Г.С., Фирсов В.В.* Спектр коротковолнового излучения Солнца при различных уровнях активности // Геомагнетизм и аэрономия. 1974. Т. 14. № 3. С. 393–398.
20. *Иванов-Холодный Г.С., Михайлов А.В.* Прогнозирование состояния ионосферы. М., 1980.
21. *Mehr F.J. and Biondi M.A.* Electron temperature dependence and recombination of O_2^+ and NO^+ ions with electrons // *Phys. Rev.* 1969. V. 181. № 1. P. 264–269.
22. *Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю.* Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М., 2006.
23. *Garcia R., Puertas M.L., Funke B., Kinnison D. and March D.* Secular trends and solar cycle variability of CO and CO₂ in the MLT. Paper presented at the 8th Workshop on Long-Term, Changes and Trends in Atmosphere, Cambridge (UK), July 2014.
24. *Qian L., Burns A.G., Solomon S.C., Roble R.G.* The effect of carbon dioxide cooling on trends in the F2 “layer ion”osphere // *J. Atmos. Solar. Terr. Phys.* 2009. V. 71. № 14–15. P. 1592–1601.
25. *Семенов А.И.* Многолетние изменения высотных распределений озона и атомарного кислорода в нижней термосфере // Геомагнетизм и аэрономия. 1997. Т. 37. № 3. С. 132–142.
26. *Гвишвили Г.В., Лещенко Л.Н.* Региональные особенности многолетних вариаций аэрономических характеристик среднеширотной верхней атмосферы // Доклады АН. 1996. Т. 346. № 6. С. 808–811.
27. *Smith P.A. and King J.W.* Long-term relationships between sunspots, solar faculae and the ionosphere // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1981. V. 43. № 10. Pp. 1057–1063.
28. *Donaldson J.K., Wellman T.J., Oliver W.L.* Long-term change in thermospheric temperature above Saint Santin // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. № A11305.

On the Causes of Cooling and Settling of the Middle and Upper Atmosphere

G. V. Givishvili¹, * and L. N. Leshchenko¹

¹*L.N. Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation (IZMIRAN),
Kaluzhskoe Hwy 4, Troitsk, Moscow, 108840 Russia*

**e-mail: givi@izmiran.ru*

It is shown that the concept of cooling and subsidence of the middle and upper atmosphere formulated in 1999 finds all new experimental evidence in various data of measurements of parameters of both neutral and ionized components of the middle and upper atmosphere. However, it is becoming increasingly clear that an increase in atmospheric CO₂ alone cannot explain the full range of observed long-term trends in the atmosphere and ionosphere. Moreover, the main source of CO₂ entry into the atmosphere is the combustion of hydrocarbon fuel on an industrial scale that binds free oxygen to carbon. And the processes caused by the reduction of O₂ in the atmosphere, oddly enough, are not considered in any theoretical model designed to explain the observed phenomena. Meanwhile, the effect of a sharp drop in O₂ concentration above the turbo-pause level is clearly recorded from the ionosphere response to solar flares.

Keywords: trends, atmosphere, ionosphere, oxygen, carbon dioxide, solar flares, models