

Стратосфера, озоновий шар і парниковий ефект



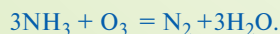
Федір Санін
доктор техн. наук,
професор
Дніпропетровського
національного університету,
м. Дніпропетровськ



Анатолій Санін
доктор техн. наук,
професор
Дніпропетровського
національного
університету,
м. Дніпропетровськ

У перші мільярди років існування Землі вулканічна діяльність була досить активною. Виверження вулканів створювали первинну атмосферу, що складалася з тих газів, що і зараз вони іноді викидають: хлор і хлороводень, фтороводень, аміак, перегріта водяна пара, окис і двоокис вуглецю, кисень, сірководень, двоокис сірки, водень, пізніше — слабо нагріта пара. При конденсації водяної пари утворилася гідросфера, у якій і зародилися елементарні живі організми.

Надалі в первинній атмосфері, завдяки діяльності синьо-зелених водоростей, з'явилися вуглекислий газ, кисень. Останній має найнижчий з усіх атмосферних газів потенціал іонізації — 12,5 В. При поглинанні енергії невидимої частини сонячного спектра атоми кисню переходять у збуджений стан і створюють молекули кисню й озону. Кисень як найсильніший окислювач перетворив аміак атмосфери Землі в азот відповідно до реакції:



Зі збільшенням вмісту кисню в атмосфері на висоті 20...30 км оформився цілий шар із високим вмістом озону. Так у стратосфері утворився озоновий шар Землі (ОШЗ), що охороняє життя від згубного впливу іонізуючої частини сонячного спектра.

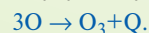
Стратосфера розташовується на висоті від 12 ± 6 км до 55 ± 5 км. Температура в стратосфері підвищується від 180 К приблизно до 300 К. Пов'язано це з тим, що стратосфера на відміну від тропосфери нагрівається не від поверхні Землі, а безпосередньо від Сонця.

Механізм нагрівання стратосферного газу полягає в наступному.

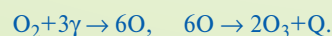
У складі сонячного випромінювання близько 9% енергії припадає на ультрафіолетове випромінювання, довжина хвилі якого перебуває в діапазоні від 4000 \AA до 100 \AA . Умовно його розділяють на два діапазони: близький ультрафіолет з довжиною хвилі від 4000 \AA до 2000 \AA та далекий — від 2000 \AA до 100 \AA . Останній ще називають твердим ультрафіолетом, найбільша частина енергії випадає на випромінювання з довжиною хвилі $2100...2900 \text{ \AA}$. Серед нього міститься і т. зв. лінія водню Лайман- α (1216 \AA). Це лінія випромінювання водню, що є основним компонентом термоядерних реакцій на Сонці. Під дією ультрафіолетового випромінювання відбувається дисоціація (розпад) молекули кисню на вільні атоми:



Оскільки довжина вільного пробігу атомів газу в стратосфері в багато разів більша, ніж у тропосфері, то атоми кисню довше перебувають у вільному стані і мають можливість створити молекулу озону:



Тепло Q, що виділилося при цій реакції, нагріває навколишній газ стратосфери, і температура в ній зростає. Сумарно весь процес можна записати так:

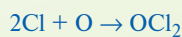


Через букву γ будемо надалі позначати загальний квант електромагнітного випромінювання, до якого, звичайно, належить й ультрафіолет.

Стратосфера звичайно дуже суха: на висоті 20 км над тропіками концентрація водяної пари становить лише 2 млн^{-1} (за об'ємом), а над полярними широтами близько 5 млн^{-1} . Вище 35 км температура помітно підвищується до висоти 50 км, де вона становить близько 270 К.

Стратопауза в складі атмосфери є перехідним шаром між стратосферою і мезосферою, у якій температура знижується з висотою і досягає 160 К в її верхній частині. Це сприяє конденсації водяної пари й утворенню на висоті близько 80 км так званих мезосферних (сріблених) хмар. Загальна кількість озону в атмосфері становить $3 \cdot 10^9 \text{ т}$ (вся атмосфера $5 \cdot 10^{15} \text{ т}$), а це значить, що при нормальному тиску товщина шару буде дорівнювати лише 3 мм. Максимальну кількість його можна спостерігати на висоті 24...26 км. Озоновий шар поглинає електромагнітне випромінювання з довжиною хвилі менше $2,9 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ (2900 \AA), що є найбільш жорстким і згубним для життя на Землі.

Багато років існує теорія про те, що головним чинником руйнування озону є фреон — з'єднання вуглецю з фтором і хлором типу C_2F_4 , $\text{C}_2\text{F}_2\text{Cl}_2$, CCl_4 . Існує міжнародна угода, відповідно до якої необхідно виключити з використання рідини і газу, що містять хлор і фтор і застосовуються в холодильній промисловості, побутових холодильниках, як миючі засоби і т.ін. Звичайно, фтор і хлор знищують, а точніше, заважають утворенню озону. На їхню частку припадає приблизно 20% руйнування. Нейтральний хлор діє як каталізатор, тобто він практично не витрачається, й один його атом може зруйнувати близько 6 тисяч молекул озону, а точніше сказати, не дасть їм утворитися:



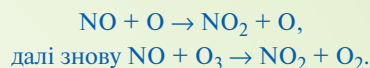
Для порятунку озонового шару, крім зниження техногенної діяльності людини в стратосфері (польоти реактивних літаків, багатьох видів ракет), деякі вчені пропонують штучно створювати електричні заряди в атмосфері. Це можна здійснити за допомогою радіовипромінювань на частотах близько 1,5 МГц, у результаті чого в стратосфері утворюються негативні йони хлору, які, на відміну від нейтральних атомів, не руйнують озон.

Передбачено, що в кожному кубічному сантиметрі буде утворено від 10 до 100 тис. вільних електронів, що і створюють негативні йони хлору. Очевидно, це стосується й інших атомів,

що мають високу спорідненість з електроном. Усе це правильно, якщо виходити з того, що озоновий шар руйнують тільки продукти розкладання фреонів. Крім того, невідомо, до яких інших наслідків може призвести електризація стратосфери.

Але справа не тільки у фреоні, у руйнуванні озону беруть участь і інші гази і навіть вода.

Руйнування ОШЗ почалося в середині ХХ сторіччя, коли з'явилася стратегічна авіація і ракетно-космічна техніка, почалися випробування ядерної зброї. Як виявилось, однією з причин руйнування ОШЗ став оксид азоту (NO). Цей газ, як і інші оксиди азоту, за винятком NO_2 , не трапляється в природі. Він утворюється внаслідок нагрівання повітря при польоті літака або ракети, коли відбувається термічна іонізація молекул кисню й азоту за реакціями:



Таким чином, оксид азоту NO не витрачається, тобто він є каталізатором, і для того, щоб реакція відбулась, достатньо його концентрації у повітрі лише 0,1%. Виявляється, швидкість окислювання NO збільшується не з підвищенням температури, а з її зниженням. Це і робить оксид азоту NO сильним фактором руйнування ОШЗ. Реагуючи з озоном, він утворить NO_2 , що при температурі -16°C перетворюється в кристали N_2O_4 , а останні опускаються в нижні шари атмосфери.

Наступною за ступенем участі в процесі знищення ОШЗ є водяна пара й окис хлору ClO. Кисневі з'єднання галогенів (ClO) надходять в атмосферу при виробництві твердого ракетного палива, сірників, піротехнічних виробів. Типовою ракетною системою з твердим паливом є прискорювачі "Спейс Шаттл". При підйомі до висоти 50 км такий космічний "човник" викидає в атмосферу 346 т водяної пари, 187 т хлору і хлористих з'єднань і 7 т азотних оксидів. У процесі фотодисоціації з озоном вода перетворюється в перекис водню, що замерзає при температурі $-0,48^\circ\text{C}$, ClO перетворюється у ClO_3 , що утворить при температурі $3,5^\circ\text{C}$ кристали ClO_6 , і вони також опускаються в аерозольний шар Землі, як і з'єднання N_2O_4 .

Найпростішу реакцію водню з киснем знає кожен школяр. Водень, потрапляючи в атмосферу, реагує з киснем, що міститься там в активному дисоційованому стані.

Звідки береться водень у стратосфері?

Частина його приходиться від Сонця (сонячний вітер) у вигляді протонів, концентрація яких значно підвищена над полюсами, звідтіля вони "скидаються" на Землю разом з електронами й утворюють полярні сніва. При підвищенні активності Сонця потоки протонів збільшуються. У 1999 — 2001 роках була найбільша активність Сонця за останні 600 років і спостерігалось зменшення озонового шару. Число Вольфа, що характеризує активність Сонця, досягало 200...220, тоді як у нормальному році воно дорівнює 8...10. Вміст водню, як продукту дегазації Землі, зростає за рахунок видобутку вугілля, природного газу, залізних та інших руд, виділення з осадових порід, льодовиків і океанів, за рахунок загального підвищення земної температури і розкладання гідратів, вміст яких більший у приполярних зонах (низькі температури).

Потрібно відзначити, що в льодовиках Антарктиди і Північного Льодовитого океану розчинений водень і сорбований метан. Останній утворює вільний водень за рахунок конверсії за реакцією:



Частина метану, як і інших легких газів, піднімається в стратосферу за законом Лапласа-Больцмана:

$$n = n_0 \exp(-mgh/kT)$$

де n_0 — число молекул в одиниці об'єму на висоті h ; m — маса молекул; g — прискорення сили тяжіння; T — абсолютна температура; k — постійна Больцмана. Звичайно, при цих процесах виділяється і кисень, але він відповідно до згаданого закону залишається в низьких шарах атмосфери.

Літаки викидають за рік близько 250 млн. т водяної пари на висотах приблизно 10 км і вище, плюс до цього потрібно додати CO_2 , NO_2 , і NO. Ці сполуки й обумовлюють знищення озонового шару і прискорення парникового ефекту. Інша можливість утворення оксидів азоту в стратосфері пов'язана з ядерними випробуваннями на великих висотах. Відповідно до виконаних розрахунків, ядерні випробування в атмосфері у 1961—1962 рр. призвели до скорочення кількості озону в північній півкулі на 3...6%. Оксиди азоту перебувають у стратосфері приблизно протягом одного року. Тому через 2—3 роки після різкого скорочення ядерних випробувань в атмосфері їхній вплив на стратосферний озон зменшувався. Дуже небезпечним є нагромадження аміаку в атмосфері, причому його відносний

вміст у атмосфері у 10^{-5} визнано критичним. Відзначимо, що внесок фреонів у знищення озонового шару становить приблизно 20%, інше належить водню, метану, оксиду азоту, шестифтористій сірці, водяній парі на великих висотах і іншим газам. Надходження їх у стратосферу, як і фреонів, має бути обмежено. Потрібно скорочувати виробництво фторопластів, полівінілхлориду тощо. Пропозиції щодо застосування нових холодоагентів можуть нашкодити, тому що нові фтористи з'єднання менш стійкі у порівнянні з вуглець-фтористими і шестифтористою сіркою, що є небезпечнішим для людини (як результат можемо отримати чисте небо над неживою природою). Поки одні борються з фреонами, наївно вважаючи їх головними винуватцями руйнування

за 160 тисяч років. Вчені взяли проби тисячолітнього льоду і зафіксували в ньому фреон, метан, водень та інші гази. Таким чином, фреон існував на Землі задовго до технічної революції.

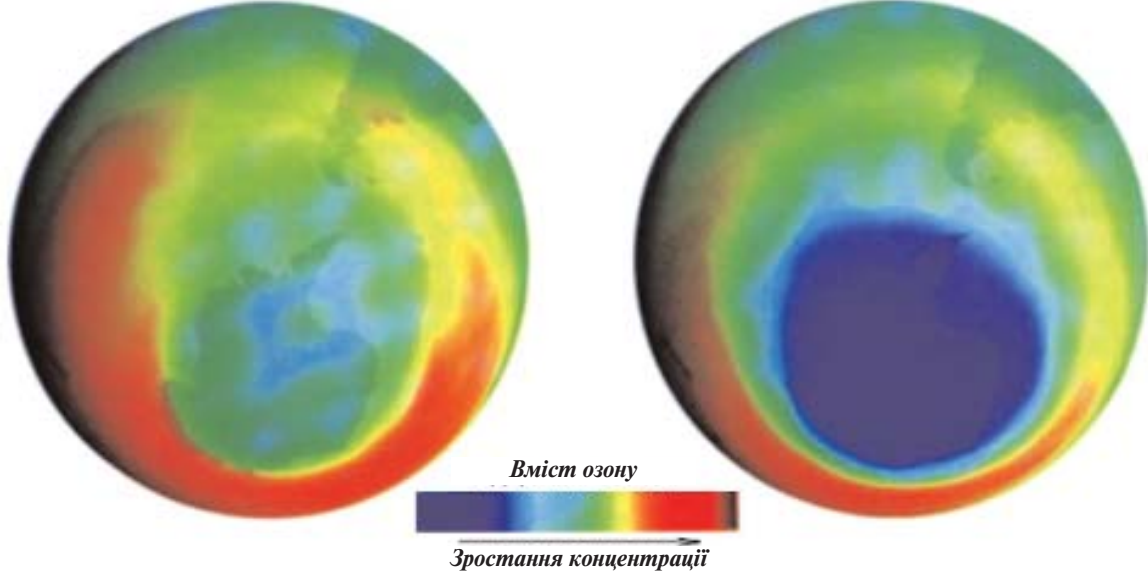
У світі згідно з Монреальською конвенцією йде заміна колишнього фреону на новий. Тільки у 1998 році Україна виділила 55 млн. гривень на переустаткування заводів та ще 23 млн. доларів у міжнародний екологічний фонд. А чи потрібно?

За останні 20 років кількість озону над Україною зменшилась на 5,6%, але основною причиною цього було підвищення температури.

В Антарктиді фреони під час полярної ночі вмерзають у лід, а коли вивільняються, руйнують озон, потоки йдуть від екватора до полюсів. Новий фреон містить шкідливі ток-

вологи, отже, більше з'явиться рослинності в посушливих районах. Відомо, що на міжнародних конференціях, що відбулися в Ріо-де-Жанейро в 1992 році і в Кіото у 1997-му, цю проблему обговорювали, і на останній конференції було прийнято т.зв. квоти щодо припустимого рівня вмісту і викидів CO_2 в атмосферу. На конференції було проаналізовано стан нижньої атмосфери в різних країнах і регіонах земної кулі на предмет вмісту CO_2 . Деякі країни перевищують припустимий рівень. Інші ще не дійшли до нього. Наприклад, скандинавські країни не досягли визначеного для них рівня, а США, Німеччина, Франція його вже перевищили. Цікаво, що промислово розвинені країни розташовані в північній півкулі, а озонову діру виявлено над південним полюсом.

Динаміка розмірів озонової діри над Антарктидою (зліва і в центрі) та озонової діри над Арктикою (права сторінка)



ОШЗ, інші продовжують безконтрольно скидати в атмосферу речовини, які руйнують озон.

Якщо зібрати весь папір, на якому висловлено турботу про збереження ОШЗ, то нею можна було б закрити не одну озонову діру. Але багаторічна кампанія за обмеження виробництва й уживання фреону не допомогла ОШЗ відновити свою колишню щільність, і от чому. Ключ до таємниці озоних дір вчені знайшли в тисячолітніх льодах Антарктиди. Вперше озонову діру було зафіксовано у 1950-х роках під час спостережень в Антарктиді на станції Максвелл. Неподаляк від тепер уже української станції (станцію Максвелл англійці в 1997 р. передали Україні) відбулося сповзання льоду, в результаті чого відкрилися відкладення 160-тисячолітньої давнини. За повітряними вкрапленнями у льоді вдалося простежити розвиток клімату на Землі

сичні добавки, а його використання призводить до підвищення енергоспоживання на 20%.

Існують різні думки з приводу парникового ефекту (термін “парниковий ефект” ввійшов у наукову лексику з XIX століття як “оранжерейний”, його ввів *С. Арреніус*). От як оцінює його *В. Друзянов* у статті “Парниковий ефект — благо для всієї Землі”, посилаючись на думку докт. фіз.-мат. наук *О. Сорокіна* і висловлюючи свою. Професор Сорокін оцінює “парниковий ефект” як позитивний: при збільшенні вмісту CO_2 в атмосфері поліпшується ріст рослин, зростає кількість біомаси. Рослини можуть поглинути до 10 млрд. т вуглецю, а зараз видобувають приблизно стільки саме умовного палива, в якому утримується близько 2 млрд. т чистого вуглецю. На нашу думку, при збільшенні вмісту CO_2 рослини вимагають менше

Група американських учених підготувала лист-звернення до урядів розвинених країн, у якому сказано, що “парниковий ефект” нікому не загрожує, і не потрібні подібні квоти на видобуток і споживання нафти, вугілля й інших видів палива. Лист підтримали начебто ще 17 тисяч вчених та інженерів. Але всі процеси, пов'язані з парниковим ефектом, поки що моделюють на комп'ютері. Згідно з цими моделями, у 2100 році на Землі може підвищитися температура на $2,5^{\circ}$ - 5°C , що викличе підвищення рівня океану на 1 метр. Крім того, розтане вічна мерзлота, льодовики, збільшиться ерозія ґрунту, площа пустель тощо. Парникові гази CO_2 , CH_4 та інші затримують довгохвильове теплове випромінювання (інфрачервоний діапазон). Але перенесення тепла в тропосфері здійснюється не радіаційним

шляхом, а конвекційним. До речі, конвекційні потоки відзначено на висоті до 80 км. Звідси можна зробити висновок, що при поширенні тепла в товщі тропосфери потрібно враховувати розширення та стиснення повітря, при яких відбувається охолодження при підйомі і, навпаки, нагрівання при опусканні. Цей підхід був підтверджений теоретичними розрахунками і вимірами температури планети Венери, що збіглися до 1...2%. Перенесення тепла в тропосфері сприяє підвищенню вологості і хмарності, що сприяє зменшенню тепла на Землі.

На думку О. Сорокіна, зараз продовжується вікове потепління, яке почалося ще у XVII столітті. Він наводить приклад з Каспійським морем, рівень якого опускався, а потім піднімався. Зараз ми живемо в міжльодовиковий

мів, ураганів, повеней не завжди підтверджує цю тезу.

Але чи тільки CO₂ відповідальний за парниковий ефект у нижній атмосфері?

Земля випромінює енергію, переважно, у діапазоні 9...10 мкм відповідно до закону T_k^4 , що відповідає температурі -18,5°C (≈ 255 K), що відрізняється від середньої глобальної температури земної поверхні, рівної 288 K. Ця різниця й обумовлена впливом “парникового ефекту”. Таким чином, Земля випромінює ніби з висоти 5,1 км. Звідси можна по-іншому поглянути на роль окремих компонентів у створенні парникового ефекту. Як не дивно, найбільший ефект у затримці інфрачервоного випромінювання Землі вносить водяна пара (62%). Потім ідуть CO₂, NO₈ і CH₄ (метан), внесок яких відповідно становить 21,7%, 7,2% і 4,2%. Вони мають вищу теплоємність, ніж двоатомні кисень і азот і одноатомний аргон, що є основними складниками повітря. Отже, їхнє накопичення підвищує загальну теплоємність атмосфери та її інерційність. Цим можна пояснити зниження континентальності клімату: м'яка зима і вищі зимові температури в містах порівняно з відкритою місцевістю. Особливо швидко підвищується вміст метану, значно швидше, ніж CO₂, приблизно на 1% за рік. Накопичення метану відбувається за рахунок виділення з вугільних шахт, льодовиків і гірських порід при підвищенні температури, стоків із трубопроводів у сільському господарстві та на виробництві.

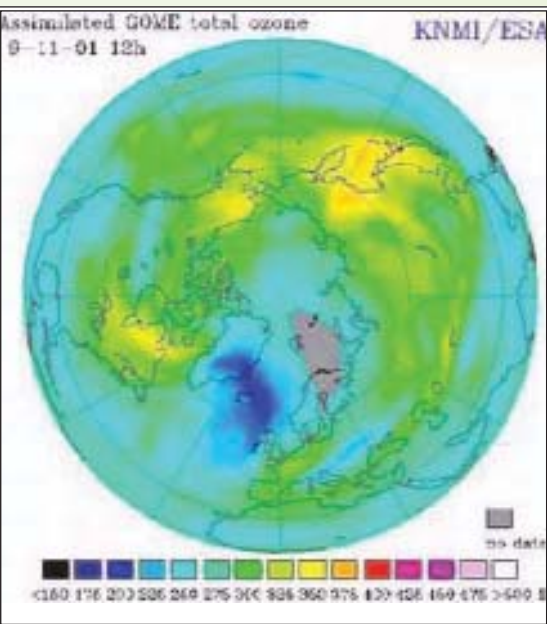
Ми вже говорили про вплив метану на руйнування озонового шару. За останні 100 років вміст CO₂ збільшився в 1,3 рази, а метану — у 2 рази, причому парникова ефективність метану в 20 разів вища, ніж CO₂. Крім того, CO₂ поглинають води океанів і морів з утворенням нерозчинних карбонатів. Отож, не потрібно боятися CO₂, його вміст регулює океан. Для людини не шкідлива його концентрація у повітрі до 3%. При підвищенні вмісту вуглекислоти більшість рослин вимагає менше води, так що й у цьому разі накопичення CO₂ є менш небезпечним, ніж метану, водяної пари, оксидів азоту й інших газів, згаданих нами. Однією з причин потепління є зменшення товщини озонового шару, мінімум якої спостерігали у 1998 році — на 12%

узимку і 7% улітку нижче, ніж звичайно. Коли в геологічному минулому було потепління, вміст CH₄ підвищувався в 450 разів, що відповідало викидові його 10¹² тонн. Потім метан вигорів, і залишився CO₂ на сучасному рівні та вода.

Спочатку температура піднялася на 7...9°C, а потім повернулася до вихідного стану. Потоп на Землі, очевидно, був, але збільшення кількості CO₂ з'явилося, скоріше, як наслідок, а не причина. Потрібно відзначити, що виробництво усіх видів енергії на Землі призводить до посилення вітрів над Світовим океаном, у результаті цього в атмосферу більше надходить частинок морської солі, які є центрами конденсації вологи. Підвищується щільність хмар, зменшується потік сонячної радіації, знижується загальна температура. Хоча нагромадження діоксидів не має прямого відношення до парникового ефекту, воно дуже небезпечне, тому що ці речовини належать до сильнотоксичних отруйних. Діоксини — це поліхлоровані поліароматичні з'єднання. Скажімо, під час війни у В'єтнамі було розпилено приблизно “лише” 150...500 кг діоксину, у результаті чого і через 30 років ґрунт там ще не відновлений.

У навколишнє середовище викинуто вже зараз кілька сотень тонн діоксидів, і цього досить для пояснення катастрофічних втрат органічної речовини в біосфері, різкого зниження кількості генофонду і зростання імунодефіциту у всіх вищих організмів. У світі виробляють близько 14 млн. тонн хлору, з них одна третина утворюється в поліхлорвінілах. Зараз у 150 містах Європи заборонено виробництво і застосування поліхлорвінілу в будівництві, на транспорті, у кабельній промисловості.

Отже, не можна однозначно визначити окремо вплив одних компонентів і процесів на зменшення товщини озонового шару без урахування інших. Необхідно застосувати комплексний підхід до розуміння механізмів явищ, які викликають коливання кількості озону та парниковий ефект. Слід об'єднати зусилля вчених багатьох країн для постановки глобальних експериментів, щоб наблизитися до розв'язання проблеми.



період, що завершиться через мільйони років, і варто очікувати суворішого клімату. Це похолодання почалося близько 100 млн. років тому. Завдяки зниженню температури вуглекислий газ поглинула морська вода, його там у 60 разів більше, ніж в атмосфері. Він міститься у зв'язаному стані у вигляді карбонатів, що є рятівним механізмом для Землі. Якби цього не було, вона б повторила долю Венери.

Збільшення CO₂ на 80% у XX ст. відбулося за рахунок потепління, але це природний хід, не пов'язаний з парниковим ефектом, хоча збільшення штор-

Література

1. Атмосфера. Справочник. — Л.: Гидрометеоздат, 1991. — 348 с.
2. Космос і технології: Учебное пособие / Ф.П.Санін, Е.А.Джур, А.Ф.Санін, В.В.Хуторний. — Д.: АРТ-ПРЕСС, 2007. — 456 с.
3. Шумлянський В. Клімат. Виклики глобалізації // Світогляд. — 2008. — Т.9, №1. — С. 26-30.
4. Сердюченко Н. Міжнародні угоди з питань клімату // Світогляд. — 2008. — Т.9, №1. — С. 32-35.
5. Околосемное космическое пространство / Под ред. Ф.С.Джонсона. — М.: Мир, 1966. — 191 с.
6. Мизун Ю.В., Мизун Ю.Г. Тайны планеты Земля. — М.: Вече, 2002. — 384 с.
7. Санін Ф.П., Санін А.Ф. Водород, озоновый слой и парниковый эффект // Персонал. — 1999. — Т. 54, №6. — С.18-20.