

УДК 502.574 : 551.510

Глобальный круговорот углерода в период усиления УФ-В радиации при вулканогенных возмущениях озоносферы

Владимир В. Зуев*

*Институт мониторинга климатических
и экологических систем СО РАН
634055 Россия, Томск, пр. Академический, 10/3¹*

Received 26.11.2008, received in revised form 3.12.2008, accepted 10.12.2008

В статье рассмотрено влияние повышенных доз биологически активной УФ-В радиации на длинах волн $\lambda \leq 310$ нм на наземные и водные экосистемы. Показано, что ускорение роста CO_2 в атмосфере в 80-90-х гг. XX в. до $1,6 \text{ млн}^{-1}$ в год произошло при систематическом росте в этот период УФ-В радиации из-за длительной вулканогенной депрессии озоносферы вследствие аномально высокой частоты извержений вулканов, выбрасывающих продукты в стратосферу. Ускорению роста атмосферного CO_2 способствовало не только подавление фотосинтетической активности в наземных и водных экосистемах, но и снижение поглотительных свойств Мирового океана из-за существенного повышения температуры его поверхности в этот период примерно на $0,7 \text{ }^\circ\text{C}$ за счет интенсивного поглощения увеличивающейся УФ-В радиации растворенным органическим веществом.

Ключевые слова: круговорот углерода, атмосферный CO_2 , УФ-В солнечная радиация, озоносфера, ОСО, стратосфера, вулканогенный аэрозоль.

Введение

Проблеме глобального круговорота углерода в последние десятилетия уделяется особое внимание, поскольку рост углекислого газа (CO_2) в атмосфере Земли, как правило, рассматривается в качестве наиболее значимого фактора, определяющего усиливающиеся изменения климата. В течение последнего тысячелетия глобальное содержание CO_2 в атмосфере сохранялось на уровне 280 млн^{-1} . Систематический рост CO_2 начался в эпоху индустриальной революции на рубеже XVIII – XIX вв., превысив к на-

стоящему времени уровень 366 млн^{-1} . Основной рост концентраций CO_2 происходил в XX в., при этом скорости нарастания атмосферных концентраций CO_2 в разные периоды были различны. Например, с 1956 по 1990 гг. концентрации CO_2 увеличивались от $315,6$ до $351,2 \text{ млн}^{-1}$ со скоростью $1,1 \text{ млн}^{-1}/\text{год}$, а за период 1980-1990 гг. скорость возросла до $1,6 \text{ млн}^{-1}/\text{год}$ (Кондратьев, Крапивин, 2004; Кузнецов, Дмитриева, 2005).

Глобальный круговорот углерода на Земле тесно связан с климатом, круговоротом воды и биогенных веществ, продукцией

* Corresponding author E-mail address: post@imces.ru

¹ © Siberian Federal University. All rights reserved

фотосинтеза на суше и в океане. Он начинается с ассимиляции растениями углекислого газа, который в хлоропластах при поглощении энергии света используется для синтеза органических веществ. Роль значительного резервуара углерода на суше играют тропические и бореальные регионы, где углерод аккумулируется в растительном покрове и почвах. В наземных экосистемах поглощаемый в результате фотосинтеза углерод либо в течение года возвращается в атмосферу, либо переходит в резервуар со временем оборота от декады до столетий. Образовавшиеся в процессе фотосинтеза органические вещества служат для построения клеточных структур, откладываются в запас или вновь расщепляются в процессе дыхания до воды и углекислого газа, выделяющегося из клетки в атмосферу. После смерти растения органические вещества клеток с помощью грибов и бактерий превращаются в неорганические, в том числе и CO_2 , который возвращается в атмосферу.

В океане поглощение CO_2 происходит вследствие его растворения карбонатной системой, которая при определенных сочетаниях параметров окружающей среды, в частности разности парциальных давлений CO_2 в атмосфере и растворенного в воде, поглощает из атмосферы углекислый газ, включающийся в трофические цепи, начиная с фотосинтеза фитопланктона. Обмен углеродом между атмосферой и океанами в значительной степени контролируется физическими процессами, в том числе перемешиванием поверхностного и глубоких слоев океана через термоклин. Биологические процессы способствуют частичному перемещению углерода из поверхностного слоя в глубокий океан, а затем в донные отложения. В Мировом океане сосредоточен самый большой запас углерода. Согласно оценкам, около 7-8 % (~1,7 Гт) органического вещества, образующегося в процессе фото-

синтеза, опускается в глубинные слои и окисляется до CO_2 (Кондратьев, Крапивин, 2004). Этот процесс уравнивается медленным подъемом воды, обеспечивая таким образом устойчивость обмена CO_2 между атмосферой и океаном.

Содержание CO_2 в атмосфере непрерывно пополняется за счет растворенных в воде карбонатов и бикарбонатов, дыхания различных организмов, в том числе и самих растений, микробиологических процессов, идущих в почве, за счет сжигания ископаемого топлива. Упрощенное представление о балансе глобального цикла углерода дает схема на рис. 1, составленная по данным из работы Г.В. Добровольского и Г.С. Куста (1996). На рис. 1 видно, что основные потоки углерода циркулируют между атмосферой, наземными и океаническими экосистемами, при этом они практически скомпенсированы. Однако нарушение стоковых составляющих в этих потоках на единицы процентов может приводить к дополнительному увеличению содержания CO_2 в атмосфере по объемам, сравнимым или даже превышающим вклады за счет антропогенного фактора. В частности, значительное влияние на фотосинтетическую активность, которая определяет основной сток атмосферного CO_2 в наземных и водных экосистемах, может оказывать УФ-В солнечная радиация в спектральном диапазоне 290-315 нм.

Усиление УФ-В радиации при вулканогенном возмущении озоносферы

УФ-В радиация составляет мизерную часть (около 0,1 %) солнечной радиации видимой и инфракрасной областей спектра. Тем не менее, она играет значительную роль в биосферных процессах. Биологическая активность УФ-В радиации объясняется тем, что из всей области оптического диапазона сол-

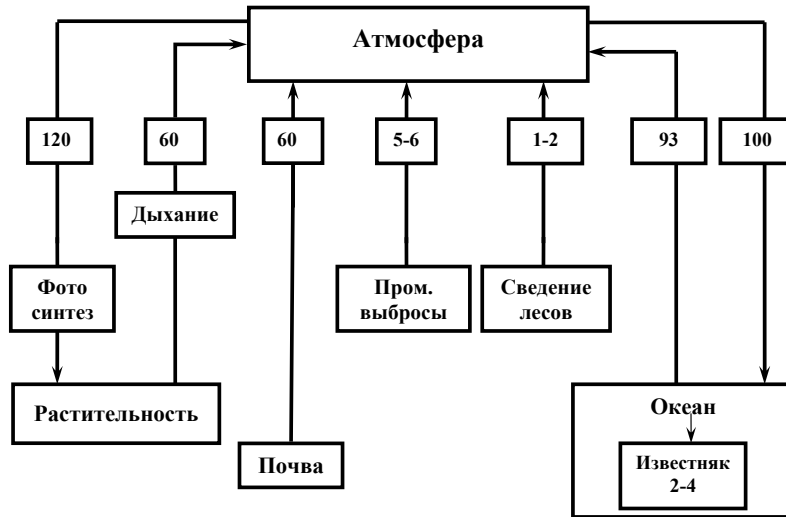


Рис. 1. Баланс глобального цикла углерода (потоки), Гт С / год

нечной радиации, достигающей поверхности Земли, она имеет наиболее высокую энергию кванта. Захват высокоэнергетичного кванта молекулой может привести к ее возбуждению вплоть до ионизации и диссоциации молекулы (Кошелев и др., 2004).

В достаточно точной степени интенсивность приземной прямой солнечной УФ радиации I_λ описывает формула Бугера (Гушин, Виноградова, 1983):]

$$\ln I_\lambda = \ln I_{\lambda 0} - \alpha_\lambda X \mu - \frac{P}{P_0} \beta_\lambda m - \delta_\lambda m_1 - \sum_{i=1}^n (a_{\lambda i} \mu_{\lambda i}) \quad (1)$$

где $I_{\lambda 0}$ – интенсивность прямой солнечной УФ радиации на верхней границе атмосферы; α_λ – коэффициент поглощения излучения озоном; X – общее содержание озона; μ – оптическая масса озона в направлении на Солнце; β_λ – оптическая толщина рэлеевской атмосферы; m – оптическая масса атмосферы; P – атмосферное давление; P_0 – атмосферное давление на уровне моря; δ_λ – оптическая толщина атмосферного аэрозоля или коэффициент аэрозольного ослабления; m_1 – оптическая масса аэрозоля; $a_{\lambda i}$ – коэффициент поглощения излучения i -й газообразной примесью в атмосфере; $\mu_{\lambda i}$ –

оптическая масса i -й газообразной примеси в атмосфере в направлении на Солнце.

Основное ослабление УФ-В радиации происходит в стратосферном озоновом слое, озоносфере, за счет поглощения в УФ-полосах Хартли и Хаггинса. В озоносфере содержится более 80 % от общего содержания озона (ОСО) в вертикальном атмосферном столбе. Поэтому основные изменения уровня УФ-В радиации в отсутствие облачности определяются преимущественно ОСО (Bojkov et al., 1995; McKenzie et al., 1997; Zerefos et al., 1998; Kondratyev, Varotsos, 2000). Следующими по значимости модуляторами УФ-В радиации являются облачность и альbedo поверхности. В нашей работе (Зуев, Зуева, 2006) показано, что в наиболее биологически активном диапазоне длин волн короче 310 нм отклонения УФ-В радиации от многолетней нормы на разных временных масштабах от суток до года определяются отклонениями ОСО с вероятностью 0,99.

Поведение озоносферы в последней четверти XX в. характеризовалось неуклонным истощением стратосферного озона, которое в значительной степени было обусловлено частыми вулканогенными возмущениями стра-

тосферы в этот период (Зуев, 2004). На рис. 2 представлены ряды наблюдений ОСО и аэрозольного наполнения стратосферы по данным Сибирской лидарной станции в Томске (Зуев, Бурлаков, 2008). Видно, что в период вулканогенного возмущения стратосферы, особенно после самого мощного в XX в. извержения вулкана Пинатубо в июне 1991 г., происходило неуклонное уменьшение ОСО (отрицательный тренд T_1). Впоследствии интенсивность и частота последующих взрывных извержений значительно ослабла, что привело к постепенному очищению стратосферы от вулканогенного аэрозоля. Лишь в 1996 г., когда аэрозольное содержание в стратосфере стало приближаться к фоновому уровню, озоносфера стала быстро восстанавливаться (положительный тренд T_2). Приоритетная роль вулканогенного возмущения стратосферы в аномальном истощении озоносферы подтверждается тем, что фоновое состояние озоносферы (близкий к нулевому тренд T_3) наступило синхронно с установлением фонового содержания аэрозолей в стратосфере (фактически нулевой тренд T_4).

Более длительные лидарные наблюдения аэрозольного наполнения стратосферы, проводимые в Гармиш-Партенкирхене (Южная Германия) с 1976 г. (Jager, Homburg, 1998), показали, что вулканогенное аэрозольное возмущение стратосферы продолжалось около 20 лет (рис. 3б). Для сопоставления на рис. 3а приведен ряд среднегодовых значений ОСО по данным наземных измерений в Арозе (Швейцария), представленным на сайте <http://www.iac.ethz.ch/en/research/chemie/tpeter/totozon.html#measurements>. Видно, что озоносфера чутко откликалась на возмущения стратосферы вулканогенным аэрозолем, особенно после мощных извержений вулканов Эль-Чичон и Пинатубо. Длительный 20-летний период аэрозольного возмущения

стратосферы характеризуется отрицательным трендом (T_1) ОСО. Активное восстановление озоносферы (положительный тренд T_2) началось только после 1996 г., когда аэрозольное наполнение стратосферы приблизилось к фоновому уровню.

В глобальном масштабе понижение среднегодовых значений ОСО в 20-летний период вулканогенной депрессии озоносферы происходило со скоростью примерно 2 % за десятилетие (Черников и др., 2000). Приблизительно с такой же скоростью повышался уровень среднегодовых значений УФ-В радиации. По скорости и глубине понижения ОСО истощение озоносферы в этот период было беспрецедентным и носило аномальный характер (Зуев, Бондаренко, 2007). Соответствующее аномальное повышение УФ-В радиации не могло не повлиять на функционирование наземных и водных экосистем и изменить баланс глобального круговорота углерода.

Отклик наземных экосистем на увеличение УФ-В радиации

Увеличение УФ-В радиации оказывает, как правило, отрицательное стрессовое влияние практически на все физиологические процессы растений, приводящее к снижению их роста и продуктивности. Воздействие УФ-В радиации на растение происходит, прежде всего, на молекулярном уровне. Схематично оно представлено на рис. 4. В основе всех нарушений жизнедеятельности растения при таком воздействии лежат повреждения биологически важных макромолекул, прежде всего нуклеиновых кислот и белков, чьи интенсивные полосы поглощения как раз расположены в УФ-В диапазоне спектра. Поглощение квантов УФ-В радиации инициирует цепь фотохимических и биохимических реакций, в результате которых серьезно нарушаются основные функции этих макромолекул.

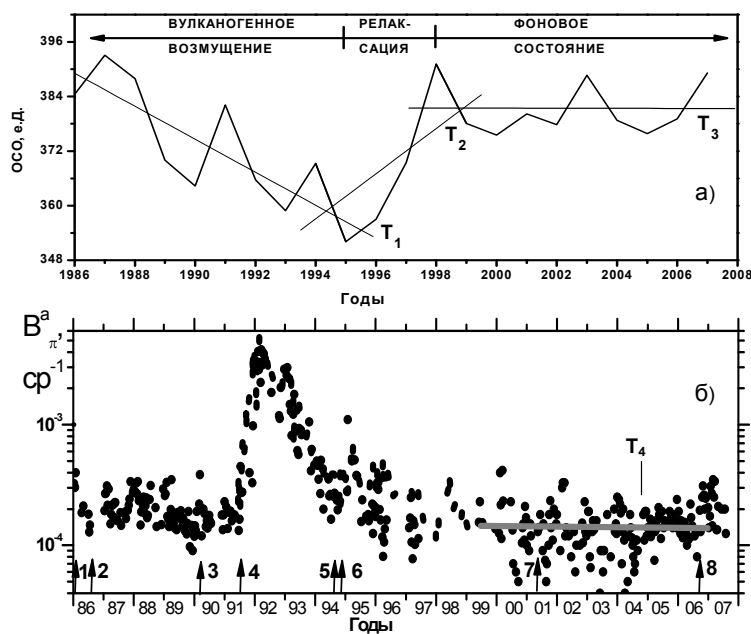


Рис. 2. Временной ряд среднегодовых значений ОСО (а) и значений интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния длине волны 532 нм (б) в Томске. Стрелками указаны извержения вулканов: 1 – Дель-Руис; 2 – Ниамурагира; 3 – Келут; 4 – Пинатубо; 5 – Рабаул; 6 – Ключевская сопка; 7 – Шивелуч; 8 – Рабаул. Прямыми линиями T₁, T₂ и T₃ обозначены тренды ОСО, а T₄ – тренд V_π^а

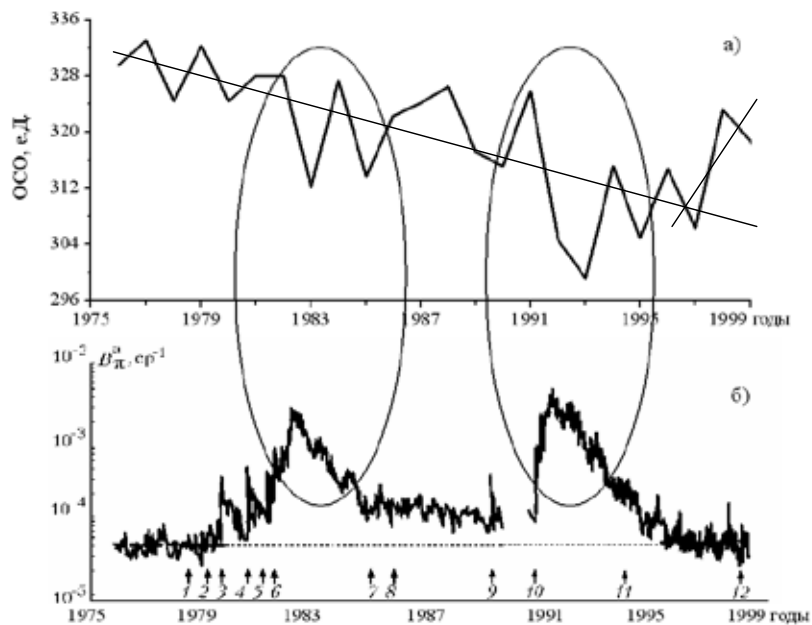


Рис. 3. Временной ряд среднегодовых значений ОСО в Арзее (а) и значений интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния, полученный в Гармиш-Партенкирхене (б). Стрелками указаны извержения вулканов: 1 – Суффриер; 2 – Сьерра-Негро; 3 – Сент-Хеленс; 4 – Алайд; 5 – Ниамурагира; 6 – Эль-Чичон; 7 – Дель-Руис; 8 – Ниамурагира; 9 – Редубт; 10 – Пинатубо; 11 – Ключевская сопка; 12 – Шивалдин. Штриховой линией обозначен фоновый уровень аэрозольного содержания. Прямыми линиями T₁ и T₂ обозначены тренды ОСО. Эллипсами выделены периоды возмущений озоносферы после извержений Эль-Чичон и Пинатубо

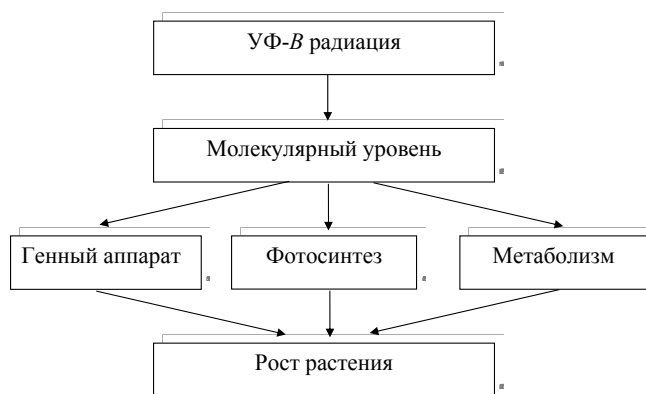


Рис. 4. Влияние УФ-В радиации на рост растения

Основными хромофорами нуклеиновых кислот являются пуриновые (аденин и цитозин) и пиримидиновые (гуанин и тиамин у ДНК, гуанин и урацил у РНК) азотистые основания нуклеотидов (Конев, Волотовский, 1974). Все эти соединения, как и соответствующие нуклеотиды и нуклеозиды, обнаруживают длинноволновую границу поглощения света при 300 нм. Поглощение фотонов УФ-В радиации основаниями ДНК запускает образование цикlobутановых димеров пиримидиновых оснований (ЦПД), что приводит к блокированию транскрипции генов при репликации ДНК (Кузнецов, Дмитриева, 2005).

Основные хромофоры белков – остатки ароматических аминокислот: в основном, триптофан и, в значительно меньшей степени, тирозин и фенилаланин. При облучении в диапазоне 270-310 нм преобладает «триптофановая» фотоинактивация (Конев, Волотовский, 1974). Поглощение триптофаном квантов УФ-В радиации запускает цепочки фотохимических и биохимических реакций, нарушающих регуляторные, ферментативные, транспортные и другие функции белков, без которых невозможен нормальный ход метаболизма и физиологических процессов.

Кроме того, благодаря процессам миграции энергии, кванты УФ-В радиации, поглощенные белком, могут использоваться для

инициирования фотохимических реакций в других хромофорах (Конев, Волотовский, 1974). В результате происходит редуцирование активности рибулозодифосфат-карбоксилазы (Rubisco) и других ферментов, снижение регуляции фотосинтетических генов и, наоборот, усиление регуляции генов фенилпропаноидного пути, снижение уровня хлорофилла и каротиноидов (DeLucia et al., 1992). За счет инициирования окислительных процессов идет перекисное окисление липидов (Britt, 1996) и окисление ауксина – индолилуксусной кислоты (Hashimoto et al., 1991). Регуляторные эффекты УФ-В радиации осуществляются также под контролем жасминовой кислоты. Эта сигнальная молекула, полученная из линоленовой кислоты, продуцирует изменения мембран под действием УФ-В радиации (Conconi et al., 1996).

На субклеточном уровне организации фотосинтетического аппарата растений повышение УФ-В радиации, как правило, приводит к инактивации фотосистемы ФС II (Greenberg et al., 1996; DeLucia et al., 1992), которая проявляется, в частности, в деградации протеинов ФС II (Schmelzer et al., 1988; Strid et al., 1994; Jansen et al., 1996). УФ-В радиация может также приводить к изменению уровня содержания фотосинтетических пигментов. В обзоре (Hollosoy, 2002) показано влияние

УФ-В радиации на деградацию хлорофиллов и каротиноидов, на содержание малонового диальдегида и состав жирных кислот в хлоропластных мембранах. Воздействие УФ-В радиации на растения может изменять интеграцию тилакоидов в хлоропластах, состав и текучесть хлоропластной мембраны, уменьшать активность Rubisco, увеличивать устьичную диффузию (Strid et al., 1994). Увеличение устьичной диффузии повышает вероятность проникновения в фотосинтезирующий орган растения различных экотоксикантов, в частности тропосферного озона, дополнительная генерация которого может провоцироваться увеличением УФ-В радиации.

Таким образом, систематическое увеличение УФ-В радиации в период длительной вулканогенной депрессии озоносферы в 1980-1990 гг. прошлого столетия должно было усиливать стресс растений, приводящий к снижению годичной продуктивности. Причем у вечнозеленых хвойных деревьев, составляющих основу бореальных лесов, этот стресс может накапливаться и усиливаться за счет кумулятивного эффекта (Šprtova et al., 1999). Действительно, согласно данным спутникового мониторинга, за последние 22 года бореальные леса обнаруживают тенденцию к снижению интенсивности фотосинтеза (Bunn, Goetz, 2006). Анализ радиального прироста древесных растений по данным сети станций дендроклиматического мониторинга в Северной Евразии также показывает отрицательный тренд годичной продуктивности древесного компонента лесных экосистем (Briffa et al., 2008).

Исследования динамики изотопного состава углерода $\delta^{13}\text{C}$ годичных колец деревьев (Ивлев, Воронин, 2007) позволяют сделать вывод, что наблюдаемое в середине прошлого столетия монотонное обогащение целлюлозы хвойных деревьев легким изотопом в 1980-

1990-х гг. сменяется более динамичным обогащением ее тяжелым изотопом ^{13}C . Изотопное фракционирование углерода в биомассе фотосинтезирующей клетки формируется за счет двух процессов, ассимиляционной и фотодыхательной активности, приводящих к противоположным эффектам (Ивлев, 1993): первый обогащает биомассу легким изотопом ^{12}C , второй – тяжелым изотопом ^{13}C . Изменение изотопного фракционирования углерода свидетельствует о снижении доминирующей в середине XX в. ассимиляционной составляющей фотосинтеза и усилении фотодыхательной составляющей, указывая на появление нового внешнего управляющего фактора, контролирующего переключения функций фермента Rubisco. Наиболее вероятно, таким фактором стали значительные озоносферные изменения, происходящие в 1980-1990-х гг. при длительной вулканогенной депрессии.

На рис. 5 на фоне изменения концентрации атмосферного CO_2 на станции Мауна-Лоа по данным сайта <http://cdiac.ornl.gov/ftp/trends/co2/maunaloa.co2> приведена динамика $\delta^{13}\text{C}$ целлюлозы древесины из ядер ливневой сосны сибирской, собранных в 70 км северо-западнее г. Иркутска, по данным (Ивлев, Воронин, 2007). Поведение полиномиального тренда третьего порядка показывает, что изменения изотопного фракционирования углерода в сторону утяжеления изотопом ^{13}C совпадает с аномальным периодом длительной вулканогенной депрессии озоносферы. Вероятно, в условиях значительных климатических изменений дисбаланс процессов самоорганизации лесных систем достиг критического состояния и появление этого нового фактора привело к тому, что компенсаторная роль бореальных лесов в регуляции увеличивающегося содержания CO_2 в атмосфере резко снизилась. В результате в 1980-1990-х гг. произошло дополнительное ускорение роста атмосферного CO_2 .

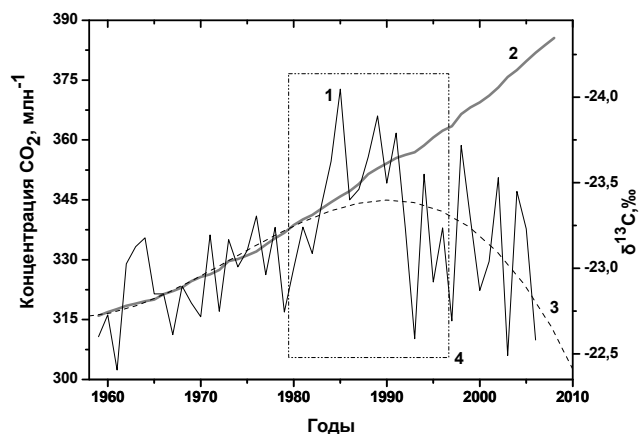


Рис. 5. Динамика $\delta^{13}\text{C}$ целлюлозы древесины лиственницы в Предбайкалье (1) на фоне изменения концентрации атмосферного CO_2 на станции Мауна-Лоа (2). Штриховой линией (3) показан полиномиальный тренд третьего порядка. Прямоугольником (4) выделен период длительного вулканогенного аэрозольного возмущения стратосферы согласно (Jager, Homburg, 1998)

Отклик водных экосистем на увеличение УФ-В радиации

Водные экосистемы охватывают широкий спектр обитания – от океанов до больших и малых озер и рек. Водные экосистемы, как правило, хорошо защищены от влияния УФ-В радиации благодаря ее эффективному поглощению уже на первых сантиметрах поверхностного слоя воды растворенным органическим веществом (РОВ), представляющим, главным образом, осколки нуклеиновых кислот. Повышение УФ-В радиации способствует разрушению молекул РОВ в поверхностном слое за счет фотодиссоциации, в результате чего УФ-В радиация может проникать уже на большие глубины. Наиболее чувствительным к воздействию УФ-В радиации является фитопланктон. Однако присущая ему мобильность дает возможность погрузиться на еще большие глубины. Но при этом нарушается полихроматический баланс светового поля, влияющий на первичную продукцию, уровень которой неразрывно связан с динамикой пищевых цепей и биохимическими круговоротами различных соединений. Еще менее защищенными от воздействия проникающей вглубь УФ-В

радиации оказываются макрофиты в прибрежной зоне шельфов, где концентрируется основная масса морской биоты. Таким образом, усиление УФ-В радиации приводит к подавлению фотосинтетической активности водных экосистем. Неудивительно, что влияние УФ-В радиации на первичную продуктивность было впервые выявлено в Антарктике, т.е. в регионе с наибольшим истощением озонового слоя.

Другой аспект влияния УФ-В радиации на круговорот углерода в системе атмосфера – океан связан с изменениями температуры поверхности океана (ТПО). Данные инструментальных измерений ТПО, представленные на сайте <http://hmc.hydromet.ru/climate/bul2002/ocean02.html>, показывают, что в последние два десятилетия XX в. рост ТПО Тихого океана составил 0,6 °C, а Атлантического – 0,8 °C.

Прогревание верхних слоев океана происходит за счет поглощения лучистой энергии, описываемое формулой

$$\frac{dT(h)}{dt} = -\frac{1}{\rho_B c_p} \int_{\Delta\lambda} \frac{dF_{\Delta\lambda}(h)}{dh} d\lambda, \quad (2)$$

где ρ_B – плотность, c_p – удельная теплоемкость воды, а

$$\frac{dF_{\Delta\lambda}(h)}{dh} = -F_{\Delta\lambda}^0 \alpha_{\Delta\lambda}(h) \quad (3)$$

– закон Бугера-Бэра, где $F_{\Delta\lambda}^0$ – интенсивность падающей на поверхность океана солнечной радиации, а $\alpha_{\Delta\lambda}(h)$ – коэффициент ослабления (в первую очередь, поглощения) водной среды в диапазоне длин волн $\Delta\lambda$.

Эффективное поглощение УФ-В радиации растворенным органическим веществом (РОВ) приводит к тому, что вклад этой мизерной части солнечной радиации в нагревание поверхностного слоя воды оказывается выше, чем в видимой и ближней ИК-областях спектра. В результате перемешивания этот вклад, естественно, замывается, но за длительные периоды он может проявиться в трендах. Выше уже отмечалось, что в период длительной депрессии озоносферы спад глобального ОСО происходил со скоростью $\sim 2\%$ за 10 лет. Этот спад привел к росту УФ-В радиации примерно на 4% за 20 лет. В соответствии с формулой (2) при средней ТПО $\sim 17,4\text{ }^\circ\text{C}$ такой рост должен привести к нагреванию поверхности Мирового океана за этот период на $0,7\text{ }^\circ\text{C}$, что полностью согласуется с данными инструментальных измерений. Следует подчеркнуть, что ни в какой другой области спектра солнечной радиации, достигающей поверхности Земли, в рассматриваемый 20-летний период столь явных изменений, как в УФ-В диапазоне, не происходило. Поэтому трудно найти иные факторы, способствующие быстрому росту ТПО.

Опережающий рост ТПО по сравнению с температурой приземного воздуха с соответствующим ростом парциального давления CO_2 в системе атмосфера – океан приводит к уменьшению поглотительных свойств океана и, соответственно, к ускорению роста CO_2 в атмосфере.

Заключение

Приведенные выше данные показывают, сколь значимо проявляются изменения мизерной части солнечной радиации в УФ-В диапазоне спектра в глобальном круговороте углерода в период аномально долгой вулканогенной депрессии озоносферы. Следует подчеркнуть, что усиление УФ-В солнечной радиации может приводить не только к подавлению фотосинтетической активности, но и к ускорению разложения неживого органического вещества с рециркуляцией CO_2 в атмосферу. Так, например, рост УФ-В радиации усиливает распад водных гумусовых веществ.

Как уже отмечалось, поведение озоносферы в 80-90-х гг. прошлого столетия было аномальным из-за высокой вулканической активности, приведшей к длительной депрессии стратосферного озона и аномальному росту УФ-В радиации. Именно в этот период наблюдалось ускорение роста CO_2 в атмосфере до $1,6\text{ млн}^{-1}/\text{год}$. Таким образом, состояние озоносферы и поля приземной УФ-В радиации, безусловно, являются значимым фактором, который необходимо учитывать во всех климатических моделях. Иначе они не могут дать корректных оценок последствий антропогенных выбросов углерода в окружающую среду.

Благодарности

Результаты исследований получены благодаря поддержке на разных этапах академиками К.Я. Кондратьевым, Е.А. Вагановым и Р.И. Нигматулиным.

Автор выражает благодарность В.И. Воронину за любезно предоставленные данные по изотопному анализу древесины лиственницы сибирской.

Работа выполнена при финансовой поддержке по гранту РФФИ №08-05-00558-а.

Список литературы

- Гущин Г.П., Виноградова Н.Н. (1983) Суммарный озон в атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 238 с.
- Добровольский Г.В., Куст Г.С. (1996) Деграция почв – «тихий кризис планеты» //Природа. №5: 54–63.
- Зуев В.В. (2004) Лидарный контроль стратосферы. Новосибирск: Наука, 307 с.
- Зуев В.В., Зуева Н.Е. (2006) Влияние вариаций суммарного озона на изменение уровня ультрафиолетовой солнечной радиации УФ-В диапазона длин волн //Оптика атмосферы и океана.. Т. 19. № 12: 1053-1062.
- Зуев В.В., Бондаренко С.Л. (2007) Исследования озоносферы методами дендрохронологии. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 160 с.
- Зуев В.В., Бурлаков В.Д. (2008) Сибирская лидарная станция: 20 лет оптического мониторинга стратосферы. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 226 с.
- Ивлев А.А. (1993) О потоках «легкого» и «тяжелого» углерода при сопряжении фотосинтеза и фотодыхания //Физиология растений. Т. 40. №6: 872-879.
- Ивлев А.А., Воронин В.И. (2007) Механизм фракционирования изотопов углерода при фотосинтезе и парниковый эффект //Известия РАН. Серия биологическая. №6: 720-728.
- Кондратьев К.Я., Крапивин В.С. (2004) Моделирование глобального круговорота углерода. М.:Физматлит, 336 с.
- Конев С.В., Волоотовский И.Д. (1974). Фотобиология. Минск: БГУ, 351 с.
- Кошелев В.В., Михалев А.В., Черниговская М.А., Тащилин М.А. (2004) Исследования изменчивости УФ-В радиации разных временных масштабов //Современные достижения в исследованиях окружающей среды и экологии: Сб. науч. статей, посвящ. памяти акад. РАН В.Е. Зуева. Томск: STT: 226-233.
- Кузнецов В.В., Дмитриева Г.А. (2005) Физиология растений. М.: Высш. шк., 736 с.
- Черников А.А., Борисов Ю.А., Зуев В.В. и др. (2000) Тенденции изменений озонового слоя по наблюдениям с помощью спутниковой аппаратуры TOMS и наземной озонметрической сети //Исследование Земли из космоса. №6: 23-32.
- Bojkov R.D., Fioletov V.E., Diaz S.B. (1995) The relationship between solar UV irradiance and total ozone from observations over southern Argentina. Geophys. Res. Lett.. V. 22: 1249-1252.
- Briffa K.R., Shishov V.V., Melvin T.M., Vaganov E.A., Grudd H., Hantemirov R.M., Eronen M., M Naurzbaev M.M. (July 2008) Trends in recent temperature and radial tree growth spanning 2000 years across northwest Eurasia. Phil. Trans. R. Soc. B 12.. vol. 363. N 1501: 2269-2282.
- Britt, A.B. (1996) DNA damage and repair in plants. Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol., vol. 47: 75–100.
- Bunn A.G., Goetz S.J. (2006) Trends in satellite-observed circumpolar photosynthetic activity from 1982 to 2003: the influence of seasonality, cover type, and vegetation density. Earth Interactions. vol. 10. Paper 12: 1-11.
- Conconi A., Smerdon M.J., Howe G.A., Ryan C.A. (1996) The octadecanoid signalling pathway in plants mediates a response to ultraviolet radiation. Nature. vol. 383: 826–829.
- DeLucia, E.H., Day, T.A. and Vogelmann, T.C. (1992) Ultraviolet-B and visible light penetration into needles of two species of subalpine conifers during foliar development. Plant Cell Environ. vol. 15: 921–929.

Greenberg B.M., Wilson M.I., Gerhardt K.E., Wilson K.E. (1996) Morphological and physiological responses of *Brassica napus* to ultraviolet-B radiation: photomodification of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase and potential acclimation processes. *J. Plant Physiol.* vol. 148: 78–85.

Hashimoto T., Shichijo C. and Yatsushashi H. (1991) Ultraviolet action spectra for the induction and inhibition of anthocyanin synthesis in broom sorghum seedlings. *J. Photochem. Photobiol.* vol. 11: 353–363.

Hollosy F. (2002) Effect of ultraviolet radiation on plant cells. *Micron.* vol. 33. N 2: 179-197.

Jager H. and Homburg F. (1998) A new aerosol background level in the stratosphere? Lidar observations of the period 1976 to 1997. 19 ILRC Abstracts of Papers. Langley Research Center. Hampton, Virginia: 335–338.

Jansen M.A.K., Gaba V., Greenberg B.M., Mattoo A.K., Edelman M. (1996) Low threshold levels of ultraviolet-B in a background of photosynthetically active radiation trigger rapid degradation of the D2 protein of photosystem-II. *Plant J.* vol. 9: 693–699.

Kondratyev K.Ya., Varotsos C.A. (2000) Atmospheric Ozone Variability: Implications for climate change, human Health and Ecosystems. Chichester U.K.: Springer PRAXIS, 758 p.

McKenzie R.L., Jonson P.P., Bodeker G.E., Kotkamp M., Dodhaine B.A., Hofmann D. J., Dutton E.G., Schnell R.C., Barnes J.E., Ryan S.C. (1997) UV spectral irradiance comparison and comparison between Mauna Loa observatory, Haqaii, and Lauder, New Zealand. in Bojkov R.D., Visconti G. (eds.) – Proc. XVIII Quadrennial Ozone Symposium – Parco Scientifico e Tecnologico d’Abruzzio, L’Aquila, Italy. PP. 857-860.

Schmelzer E., Jahnen W. and Hahlbrock K. (1988) In situ localization of light induced chalcone synthase mRNA, chalcone synthase, and flavonoid end products in the epidermal cells of parsley leaves. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* vol. 85: 2989–2993.

Sprtova M., Marek M.V., Nedbal L., Prasil O., Kalina J. (1999) Seasonal changes of photosynthetic assimilation of Norway spruce under impact of enhanced UV-B radiation. *Plant Science.* 142: 37–45.

Strid, A., Chow, W.S. and Anderson, J.M. (1994) UV-B damage and protection at the molecular level in plants. *Photosynth. Res.* vol. 39: 475–489.

Zerefos C., Meleti C., Balis D., Tourpali K., Bais A.F. (1998) Quasi-biannual and longer-term changes in clear-sky UV-B solar irradiance. *J. Geophys. Res. Lett.* v.25. N23: 4345-4348.

Carbon Global Cycle in a Period of UVB Radiation Increase under Volcanogenic Disturbance of Ozonosphere

Vladimir V. Zuev

*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems,
Siberian Branch of the Russian Academy of Science
10/3 Akademicheskyy, Tomsk, 634055 Russia*

The influence of heightened doses of the active UVB radiation at the wavelength $\lambda \leq 310$ nm upon surface and aquatic ecosystems is examined in the article. We show that the CO_2 growth in the atmosphere in the 1980-90s up to 1.6 million a year occurred under regular growth of the UVB radiation in this period as a result of the ozonosphere continuous volcanogenic depression because of abnormally high frequency of volcano eruptions, spreading their products in the stratosphere. Not only the photosynthetic activity depression in surface and aquatic ecosystems but also the decrease of the ocean absorption property as a result of the essential temperature increasing of its surface approximately by $0.7^\circ C$ in this period because of intensive absorption of the rising UVB radiation by dissolved organic substance predetermine the CO_2 acceleration of growth.

Keywords: carbon global cycle, atmospheric CO_2 , UVB solar radiation, ozonosphere, total ozone content (TOC), stratosphere, volcanogenic aerosol.
