

ИЗ ИСТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЙ ПАРНИКОВОГО ЭФФЕКТА ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ

Часть 2¹

В.М. Шрайбер

Балаш Наноанализис, Фримонт, Калифорния (США)

Эл. почта: vmshrayber@yahoo.com

Статья поступила в редакцию 00.00.2015; принята к печати 00.00.2015

Статья представляет собой вторую часть краткой истории исследований парникового эффекта земной атмосферы и возникновения концепции усиления этого эффекта из-за антропогенного повышения уровня углекислого газа. Самый ранний этап этой истории – от открытия парникового эффекта (Фурье, 1824 г.) до конца сороковых годов двадцатого века – описан в первой части (Биосфера. 2013;5:37-46). Вторая часть охватывает период с 1945 по 1960 г., когда был выполнен, главным образом американскими исследователями, ряд работ, которые стали важным звеном развития концепции антропогенного усиления парникового эффекта. Что касается работ 1960–1970-х, в том числе за авторством российских ученых, они будут рассмотрены в следующей части этой серии статей.

Ключевые слова: парниковый эффект, история науки, антропогенные эффекты.

ON THE HISTORY OF STUDYING THE GREENHOUSE EFFECT OF EARTH'S ATMOSPHERE

Part 2

V.M. Shrayber

Balazs NanoAnalysis, Fremont CA., USA

E-mail: vmshrayber@yahoo.com

The present article is the second part of a concise narrative about the studies of the greenhouse effect and the rise of the concept of enhancement of this effect due to the anthropogenic increase in the level of carbon dioxide in the air. The earliest events from the discovery of the greenhouse effect by Fourier in 1824 through the end of 1940s were addressed in the first part (Biosfera. 2013;5:37-46). The second part covers the period of 1945 to 1960 when a series of investigations were carried out, mainly in the USA, to become an indispensable part of the concept of anthropogenic enhancement of the greenhouse effect. As to studies published in the next decade, including those authored by Russian scientists, they will be addressed in the next part of this series.

Keywords: greenhouse effect, history of science, anthropogenic effects.

Вступление

Настоящая статья представляет собой вторую часть рассказа об истории исследований парникового эффекта земной атмосферы и возникновения концепции усиления парникового эффекта из-за антропогенного повышения уровня углекислого газа. Самый ранний этап этой истории – от открытия явления парникового эффекта (Фурье, 1824 г.) до конца сороковых годов двадцатого века – описан в первой части [1]. Вторая часть охватывает период приблизительно с 1945 по 1960 г. За это время появились работы, выполненные, главным образом, американскими исследователями, ставшие, как будет показано ниже, важным звеном выше концепции антропогенного усиления парникового эффекта. В то же время имена авторов, как и примечательные обстоятельства, обусловившие возможность выполнения таких исследований, обычно не упоминаются в русскоязычных изданиях. Что касается ученых других стран, в том числе советских (российских)², то их публикации, касающиеся влияния антропогенных факторов на климат вообще и парникового эффекта в частности, появились несколько позже – в 60–70-х гг. и будут рассмотрены в следующей части.

¹ Часть 1 см. [1].

² Имеются в виду в первую очередь М.И. Будыко, Ю.А. Израэль, К.Я. Кондратьев.

Прежде чем приступить к Части 2, кратко напомним содержание Части 1.

Идея парникового эффекта, создаваемого земной атмосферой, впервые была сформулирована в 1824 г. французским ученым Ж. Фурье (Jean-Baptiste Joseph Fourier, 1768–1830) [7]. Фурье проделал расчеты, из которых следовало, что небесное тело, не имеющее атмосферы и находящееся на таком же расстоянии от Солнца, как Земля, должно иметь значительно более низкую температуру, чем реальная температура Земли. Фурье пришел к выводу, что более высокая температура Земли объясняется тем, что земная атмосфера, прозрачная для излучения Солнца, поглощает значительную часть инфракрасного излучения Земли, тем самым задерживая его и повышая температуру Земли. Этот эффект повышения температуры поверхности планеты благодаря наличию атмосферы был назван «парниковым эффектом». Не будь этого эффекта, температура Земли была бы ниже на ~ 33 °С.

Спустя четверть века, в 1859 г., английский физик Джон Тиндаль (John Tyndall, 1820–1893) обнаружил, что поглощать инфракрасное излучение способны пары воды и углекислого газа [13], в то время как азот и кислород такой способностью не обладают. Это, естественно, привело к выводу, что именно вода и углекислый газ отвечают за атмосферный парниковый эф-

фект. Гиндаль высказал также гипотезу, что процессы формирования, а затем таяния ледников могли быть связаны с изменениями парникового эффекта из-за изменения содержания углекислого газа в атмосфере.

Первым, кто высказал мысль о возможности изменения парникового эффекта за счет антропогенной эмиссии углекислого газа, был шведский ученый Сванте Аррениус (Svante August Arrhenius, 1859–1927) [3]. В 1896 г. он выполнил расчет вариации температуры Земли на различных широтах при вариации содержания углекислоты в атмосфере. Из расчета следовало, что при уменьшении концентрации CO_2 в два раза средняя температура Европы снизится на 4–5 °С, и наоборот, удвоение содержания углекислого газа может вызвать повышение температуры примерно на такую же величину.

Аррениус и принимавший участие в работе профессор Арвид Хогбом полагали, что поступление углекислоты в атмосферу могло происходить путем естественных геохимических процессов – в первую очередь извержений вулканов, а также разложения карбонатов, сгорания и разложения органики, сгорания метеоритов в верхних слоях атмосферы и т. д. Вместе с тем, им пришла в голову идея сделать оценку количества двуокиси углерода, выбрасываемой в атмосферу при сжигания угля и другого топлива на промышленных предприятиях того времени. Получилась величина, сопоставимая с теми, которые испускаются при естественных геологических процессах. Она составляла примерно одну тысячную часть от количества, уже содержащегося в атмосфере. По этим же оценкам, такое антропогенное повышение содержания углекислого газа в атмосфере может привести к заметному повышению температуры Земли примерно через 3000 лет.

Этот результат Аррениус рассматривал не как достоверный прогноз, а, скорее, как любопытный теоретический факт. И все же в 1908 г., обнаружив, что за прошедшие десять лет объем промышленных выбросов углекислого газа значительно возрос, он в книге [4] указывал возможность заметных изменений климата уже не через 3000, а через несколько сот лет.

Вскоре, однако, другой шведский ученый, Кнут Ангстрем (Knut Johan Ångström, 1857–1910) подверг работу Аррениуса критике [2]. Ангстрем сообщил, что из результатов его измерений следует, что основной вклад в парниковый эффект дают пары воды и, к тому же, при нынешнем содержании воды и углекислого газа в атмосфере парниковый эффект является насыщенным, так что прибавка еще какого-то количества углекислого газа уже ничего не изменит. После этого интерес к проблеме влияния углекислого газа на климат Земли угас, казалось бы, навсегда.

Однако в конце 1930-х гг. идея Аррениуса вновь заявила о себе благодаря усилиям английского инженера и исследователя по имени Гай Стюарт Каллендер (Guy Stewart Callendar, 1898–1964). Существенную роль сыграло то, что в свете новых данных об инфракрасных спектрах атмосферных газов, полученных за годы, прошедшие после работ Аррениуса и Ангстрема, результаты измерений Ангстрема и его вывод о насыщенности парникового эффекта уже не могли считаться точными. Поэтому Каллендер проигнорировал приговор, вынесенный Ангстремом работе Аррениуса.

Анализируя имеющиеся данные об углеродном цикле, Каллендер пришел к выводу, что содержание углекислого газа в атмосфере повысилось от 292 ppm в 1900 г. до 310 ppm в 1936 г. (то есть ~ на 6%) и что эта разница близка к количеству CO_2 , выделившегося при сгорании углеводородного топлива за этот же период. Он собрал и систематизировал данные измерений температуры на двухстах метеорологических станциях в различных районах Земли и нашел, что в течение полувека (с 1900 по 1930 г.) температура Земли ежегодно повышалась в среднем на 0,005 °С. Он также проделал расчеты, которые окончательно убедили его в том, что подъем температуры является следствием роста концентрации углекислого газа [5].

Его работа стала первой, где утверждалось, что потепление климата, которое Аррениус лишь гипотетически допускал, уже реально происходит и что рост температуры коррелирует с ростом содержания углекислого газа.

Эта и последующие работы Каллендера большинством метеорологов были встречены с недоверием. Многие из них не понимали физики парникового эффекта, но зато лучше Каллендера владели конкретной климатологической информацией и хорошо понимали, насколько сложным объектом является атмосфера Земли и как много процессов, происходящих в ней, осталось за пределами чрезвычайно упрощенной схемы Каллендера.

Длительное время Каллендер защищал свою позицию практически в одиночку [6]. Кто-то из журналистов уже в наши дни сказал о Каллендере: «A lone voice in the greenhouse (одиноким голосом в парнике)».

Каллендер был огорчен и растерян, когда в начале 1950-х гг. отстаиваемое им потепление неожиданно сменилось волной похолодания, между тем как эмиссия углекислого газа продолжала возрастать. Вскоре Каллендер умер. Тем не менее, спустя десяток лет в лабораториях нескольких американских университетов нашлись люди, которые вновь заинтересовались исследованиями парникового эффекта и его влияния на климат планеты.

Первые модельные расчеты парникового эффекта с помощью компьютера. Гильберт Пласс



Гильберт Пласс
Gilbert N. Plass,
(1920–2004)

Следующий рывок в науке о парниковом эффекте произошел в конце 1940-х – начале 1950-х гг. Этому благоприятствовали следующие обстоятельства.

После Второй мировой войны в Военно-морском ведомстве Соединенных Штатов осознали, что климат, погода и состояние атмосферы оказывают существенное влияние на ведение боевых действий, особенно в воздухе и на море. Было начато финансирование научных исследований в области метеорологии, океанографии и физики атмосферы.

Другим обстоятельством было появление в начале 1950-х гг. первых коммерческих компьютеров. Как известно, важную роль в этом сыграл выдающийся математик Джон фон Нейман (John von Neumann, 1903–1957), разработавший основные принципы построения и функционирования современных компьютеров. Фон Нейману же принадлежала и идея использования компьютеров для прогнозирования погоды и других задач метеорологии. Одним из первых, кто сумел использовать открывшиеся новые возможности, был американский исследователь Гильберт Пласс (Gilbert N. Plass, 1920–2004).

В 1947 г. Пласс был принят на должность ассистента в университет Джонса Хопкинса, где сосредоточился на исследованиях инфракрасного излучения и его распространения в атмосфере. Эти исследования как раз и финансировались Военно-морским ведомством. Работа Пласса по существу была прямым продолжением работы Аррениуса, только модель была совершеннее, а уровень расчетов – намного выше. Эксперимент по распространению потока инфракрасного излучения Земли в атмосфере, который мысленно представлял себе Пласс, сильно отличался от лабораторного.

Во-первых, в лабораторном эксперименте свойства газа остаются постоянными внутри кюветы по ее длине. А в атмосфере температура, давление и вместе с ними спектральные характеристики меняются по высоте атмосферного столба, причем очень значительно.

Во-вторых, при измерении спектров поглощения газов в лабораторных условиях обычно используется внешний источник излучения, температура которого намного выше температуры исследуемого газа. Соответственно, и мощность светового потока, идущего от источника через кювету с образцом газа, намного больше мощности излучения самого газа, нагретого проходящим светом. Поэтому в большинстве случаев можно или пренебречь излучением образца, или учесть его как малую поправку. Иное дело – прохождение теплового излучения Земли сквозь атмосферу. В этом случае температура источника – Земли – ненамного превышает температуру прилегающих слоев атмосферы. Слой атмосферы, поглотивший полностью или частично проходящее излучение, нагревается и сам становится источником для следующего слоя. Как уже отмечено в Части 1, процесс такого типа называют не поглощением излучения, а переносом излучения.

Г. Плассу необходимо было научиться вычислять количество тепла, поглощаемого атмосферой в таком процессе, и возникающие при этом изменения температуры. Подход к решению подобных задач был дан в работах известного астрофизика Карла Шварцшильда (Karl Schwarzschild, 1873–1916). Пласс разработал методику численного решения задачи о по-

слойном переносе ИК излучения в атмосфере [10]. При этом он учитывал такие спектроскопические эффекты, о которых его предшественники не имели представления: структуру колебательных полос поглощения, связанную с вращением молекул (о чем подробнее говорилось в [1]), изменения ширины, формы и степени перекрывания полос с изменением температуры и давления, а также различия между узко направленным потоком (типа используемого в лабораторных измерениях) и широким сильно расходящимся потоком, испускаемым полусферой (Землей). Решать и вычислять все это вручную, как делали Аррениус или Каллендер, было невысказано. Однако Пласс получил доступ к одному из лучших тогдашних компьютеров типа MIDAC. Это позволило ему вычислять изменение температуры на любом уровне от поверхности Земли до высоты 75 километров при изменении концентрации углекислого газа. Из полученного им решения следовало, что, вопреки утверждению Ангстрема [2], полное насыщение парникового эффекта не наступает даже в областях сильного поглощения парникового газа. Согласно результатам расчетов Пласса, удвоение концентрации CO_2 должно привести к повышению температуры земной поверхности на $3,6^\circ\text{C}$, а уменьшение концентрации вдвое – примерно к такому же понижению температуры. Качественно этот результат сходен с аррениусовским, только цифра поменьше³.

Не ограничиваясь чистой физикой, Пласс анализировал также баланс углекислоты в природе, кислотно-основное равновесие в океанской воде, обмен углекислым газом между океаном и атмосферой и влияние всех этих факторов на климат. В итоговой публикации 1956 г. [11] Пласс перечисляет следующие факты и явления, которые, по его мнению, могут быть поняты и объяснены на базе «углекислотной» теории климата.

1. Периодические осцилляции температуры планеты и переходы от образования (или увеличения площади) ледников к их исчезновению (уменьшению).
2. Одновременное понижение температуры и увеличение количества осадков, которое, по мнению ряда ученых, необходимо для формирования толстого ледового покрова. Такого рода одновременность, по мнению Пласса, нельзя объяснить в рамках предположений об уменьшении интенсивности поступающей на Землю солнечной радиации, но можно, если допустить, что имело место уменьшение содержания углекислого газа в атмосфере.
3. Наличие значительной временной задержки (порядка нескольких миллионов лет) между эпохой формирования горных массивов и последующей эпохой оледенения.
4. Наступление самого мощного за всю историю Земли процесса оледенения именно в конце Каменноугольной эпохи.
5. Синфазное повышение температуры обоих полушарий, начавшееся примерно после 1890 г., причем более значительное потепление в Северном полушарии.

В заключение Пласс написал, что ежегодное добавление в атмосферу 6×10^9 тонн CO_2 (данные 1956 г.) из-за сжигания углеводородного топлива вкупе с вы-

³ Чуть позднее Пласса другой исследователь, Льюис Каплан, получил еще меньшую цифру и считал, что модель Пласса дает завышенный результат.

рубкой и сокращением лесных массивов на несколько порядков превосходит эмиссию CO_2 естественными природными источниками и нарушает баланс углекислого газа в природе. По мнению Пласса, абсорбция избыточного углекислого газа мировым океаном происходит медленно из-за медленного перемешивания поверхностных слоев, насыщенных углекислотой, с глубинными слоями. Так что значительная часть поступившего в атмосферу CO_2 остается там на столетия, а его общая концентрация в атмосфере растет быстрее, чем когда-либо в истории Земли.

Сегодня наверняка можно отыскать в этих выводах Пласса те или иные неточности. Однако надо подчеркнуть сам факт, что Пласс размышлял об этих проблемах и анализировал их, писал об этом. Об этом важно сказать, так как во многих публикациях критиков концепции влияния антропогенной эмиссии CO_2 на климат читатели найдут слова о том, что климатические изменения многократно уже имели место в истории Земли, что климат вообще неустойчив; что периоды потепления неоднократно сменялись периодами похолодания и даже образования ледников, и все это происходило без малейшего участия человечества; что океан содержит в 100 раз больше углекислоты, чем атмосфера, и потому избыток углекислоты, добавляемый индустрией, полностью поглощается океаном; что главной и практически единственной причиной климатических изменений является изменение мощности солнечной радиации и т. д. и т. п. И у читателей возникает впечатление, что создатели теории глобального потепления – то ли полные невежды, которые не знают простых и фундаментальных фактов, то ли намеренно их игнорируют. А в действительности – и знали, и не игнорировали, а хорошо ли, плохо ли, но учитывали, анализировали и включали в свои теории.

Работы Пласса были, по всей вероятности, первыми исследованиями, касающимися проблемы влияния человеческой деятельности на климат, о которых в Америке стало известно широкой публике. В 1956 г. вышла статья Пласса в научно-популярном журнале *American Scientist* [12]. Затем в газете *New York Times* появилась заметка под названием «Warmer Climate on the Earth May Be Due To More Carbon Dioxide in the Air». В заметке утверждалось, что исследования, выполненные доктором Плассом при поддержке Военно-морского ведомства, показывают, что эмиссия углекислого газа в технологических процессах уже значительно превышает эмиссию вулканов и гейзеров и что дальнейшее увеличение содержания углекислого газа в атмосфере может привести к заметному изменению климата в сторону потепления.

Работы Гильберта Пласса положили начало компьютерному моделированию как одному из способов исследования парникового эффекта и воздействия на него антропогенных факторов. Модель Пласса можно рассматривать как приближение более высокого порядка, чем модель Аррениуса, но все-таки лишь как приближение, все еще далекое от полного анализа сложнейшей экологической системы, какой является Земля вместе с атмосферой. Ряд очень важных факторов, имеющих влияние на температуру Земли и атмосферы, остались неучтенными.

Во-первых, модель Пласса была одномерной: атмосферный столб. Все изменения, все процессы – только по высоте. Перемещения воздуха и перенос

тепла в горизонтальном направлении в этой модели отсутствовали. Во-вторых, хотя Пласс анализировал обмен углекислотой с океаном, обмен теплом с океаном и взаимосвязь температуры и влажности не анализировались. В-третьих, в модели отсутствовали облака и аэрозоли, являющиеся, как стало ясно позднее, очень важными факторами, влияющими на распределение температуры. В-четвертых, исследуя изменение температуры при изменении содержания углекислого газа, Пласс считал неизменными все остальные свойства и параметры системы, а это нереально. Уже и в то время было известно, что в экологических системах все взаимосвязано и обратные связи играют важную роль. Таким образом, ничуть не умаляя заслуг Пласса, можно сказать, что до окончательного – пусть даже модельного, теоретического – решения проблемы было все еще далеко.

Вместе с тем, публикации Пласса и его соавторов, выполненные на высоком для тех лет уровне и под эгидой Военно-морского ведомства США, несомненно, привлекли большее внимание метеорологического сообщества, чем работы Каллендера, на которых лежал отпечаток доморощенности. Выводы, сделанные Плассом, не содержали утверждений, что эмиссия углекислого газа уже достигла опасной черты или что всемирное потепление уже идет. Однако ему удалось продемонстрировать, что проблема заслуживает внимания. При этом для тех, кто пожелал бы принять в этом участие, открывалось довольно обширное поле деятельности, включающее физику атмосферы, оптику, спектроскопию, термодинамику, исследования теплообмена и молекулярного обмена между атмосферой и океаном, разработку методов аккуратного измерения температуры планеты и концентрации углекислого газа, компьютерное моделирование и т. д.

И появление желающих заняться этими вопросами не заставило себя долго ждать.

Роджер Ревелл и Институт океанографии в Сан-Диего



Роджер Рэндалл Ревелл
Roger Randall Dougan Revelle,
(1909–1991)

Примерно в то же время, когда Гильберт Пласс публиковал заключительную статью своей «углекислотной» теории климата, важные события развора-

чивались на юге Калифорнии в окрестностях города Сан-Диего, в курортном местечке Ла Хойе, где располагался Институт океанографии, носящий имя Эллен Скриппс (Scripps Institute of Oceanography). Движущей силой, мотором всех этих событий был тогдашний директор института Роджер Ревелл (Roger Randall Dougan Revelle, 1909–1991).

В 1936 г. Роджер Ревелл, получив докторскую степень по океанографии в Беркли, начал работать в Институте Скриппс. В годы Второй мировой войны он служил океанографом во флоте США и, видимо, зарекомендовал себя ценным специалистом. Во всяком случае, в конце сороковых годов Военно-морское ведомство стало привлекать его в качестве эксперта, дающего рекомендации, какие именно научные исследования стоит финансировать по линии этого ведомства, а какие – нет. При этом Ревелл отстаивал идею, что нужно поддерживать фундаментальные исследования, а не ограничиваться чисто технологическими разработками.

В 1950 г. Ревелл занял пост директора Института Скриппс и на этом посту развернул чрезвычайно бурную деятельность. В годы его директорства сравнительно небольшой, локального значения институт превратился в мощный исследовательский центр международного значения. Добившись поддержки от Военно-морского ведомства, Ревелл организовал одну за другой несколько долгосрочных экспедиций по исследованию различных районов Тихого океана.

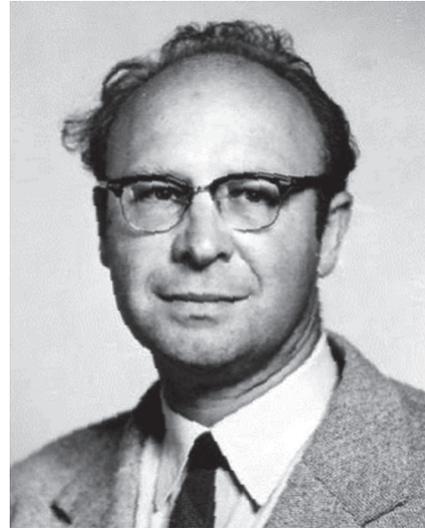
По заданию правительства США Ревелл занимался изучением вопроса о возможных последствиях радиоактивного загрязнения океана в случае проведения надводных или подводных ядерных взрывов или захоронения отходов ядерных реакторов. Он, в частности, обнаружил, что загрязнение поверхностного слоя океана очень быстро распространяется вширь, захватывая сотни квадратных километров, но чрезвычайно медленно вглубь из-за медленной циркуляции воды по вертикали. В какой-то момент он оказался во главе комитета, созданного Академией наук США, по изучению биологических эффектов атомной радиации, воздействия радиации на океанскую фауну и флору. В 1956 г. Ревелл опубликовал отчет об этих работах и в дальнейшем был противником проведения ядерных испытаний в океане.

Ревелл был одним из нескольких ученых, осуществлявших планирование и организацию участия США в программе Международного геофизического года, и первым президентом международного комитета по океанским исследованиям. Он также был инициатором и одним из организаторов отделения Калифорнийского университета в Сан-Диего. В результате благодаря усилиям Ревелла в Сан-Диего образовался учебно-научный центр, включающий университет и Институт Скриппс. Ревелл старался привлечь в этот центр ученых высокого класса с новыми идеями и создать для них максимально благоприятные условия.

В обширный круг интересов Ревелла, знакомого с работами Каллендера и Пласса, входил и вопрос о том, насколько быстро и эффективно океан способен абсорбировать избыток углекислого газа, образовавшийся в атмосфере из-за сжигания углеводородного топлива. По этой причине среди ученых, приглашенных Ревеллом в Сан-Диего, оказались два

человека, чьи исследования непосредственно касались этой проблемы. Одним из них был известный австрийский ученый Ганс Зюсс (Hans Eduard Suess, 1909–1993), другим – пока еще никому не известный молодой исследователь Чарльз Килинг (Charles David Keeling, 1928–2005).

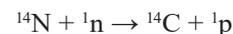
Ганс Зюсс. Применение радиоуглеродного датирования в климатических исследованиях



Ганс Зюсс
Hans Eduard Suess
(1909–1993)

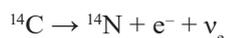
Австриец Ганс Зюсс (Hans Eduard Suess, 1909–1993) – ученый широкого профиля – был одним из крупнейших в Европе специалистов в области ядерной физики, физической химии и химии изотопов. В период Второй мировой войны Зюсс был включен в группу немецких ядерщиков, пытавшихся создать немецкую атомную бомбу. После войны многие участники этой группы так или иначе затем оказались в других странах. Ганс Зюсс эмигрировал в США в 1950 г. В Институте ядерных исследований Чикагского университета Зюсс познакомился с профессором Уиллардом Либби, который незадолго до этого разработал остроумный метод определения возраста любых углеродсодержащих веществ и материалов, получивший название «радиоуглеродного датирования»⁴. Метод основан на измерении содержания радиоактивного изотопа углерода ¹⁴C в анализируемом материале.

Изотоп ¹⁴C образуется в верхних слоях атмосферы под действием космических лучей. Высокоэнергетичное излучение, приходящее из космоса, выбивает нейтроны из атомов и молекул. При столкновениях нейтронов с атомами азота ¹⁴N происходит реакция, при которой азот, поглощая нейтрон и испуская протон, превращается в радиоактивный углерод с атомным весом четырнадцать:



Со временем ¹⁴C распадается по механизму β-распада с образованием азота (а также β-электрона и нейтрино).

⁴ В 1960 г. Уиллард Либби получил за это Нобелевскую премию по химии.



Период полураспада составляет 5730 лет. В атмосфере углерод ^{14}C быстро окисляется до двуокси или окиси углерода (CO_2 или CO) и дальше попадает в кругооборот углерода в природе. Поэтому относительное содержание ^{14}C в органическом веществе в момент его образования равно содержанию ^{14}C в атмосфере, а затем уменьшается со временем. Чем больше возраст вещества, тем меньше в нем концентрация ^{14}C . Отсюда вытекает возможность определения возраста вещества по количеству содержащегося в нем углерода ^{14}C . В дальнейшем это сделало радиоуглеродный анализ незаменимым инструментом в руках археологов.

Хотя автором идеи был Уиллард Либби, широкое практическое применение этого метода стало возможным после еще нескольких важных работ, выполненных другими учеными, в том числе Зюссом. Одним из достижений Зюсса явились измерения содержания ^{14}C в годовых кольцах многовековых деревьев, фрагменты которых доставлялись в его лабораторию из различных районов Северной Америки. В результате измерений было обнаружено повышенное содержание стабильных изотопов углерода ^{12}C и ^{13}C (и, соответственно, пониженное содержание ^{14}C) в годовых кольцах, относящихся к двадцатому столетию. Это явление он объяснил поступлением в атмосферу значительного количества углекислого газа, выделившегося при сгорании ископаемого топлива. Поскольку период полураспада радиоактивного углерода всего лишь 5700 лет, в ископаемом топливе (уголь, нефть, природный газ), образовавшемся миллионы лет назад, его содержание практически равно нулю. Антропогенная эмиссия молекул CO_2 , не содержащих ^{14}C , снижает общую концентрацию ^{14}C в атмосфере и в растительности, использующей CO_2 для фотосинтеза.

Таким образом, оказалось, что радиоактивный изотоп углерода является своего рода меткой, с помощью которой можно следить за перемещением масс углекислого газа из одной природной среды в другую.

В 1955 г. Зюсс перебрался в Сан-Диего, где Роджер Ревелл предложил ему должность профессора геохимии. Заняв эту должность, Зюсс организовал лабораторию радиоуглеродного анализа и начал исследование абсорбции углекислого газа океаном. Эта проблема является одной из ключевых при решении вопроса о реальности усиления парникового эффекта за счет антропогенной эмиссии углекислого газа.

В 1957 г. Ревелл и Зюсс опубликовали полученные к этому моменту результаты [13]. В первой части работы, используя данные Зюсса о концентрации молекул CO_2 , меченых ^{14}C , в атмосфере и океане и уравнение, описывающее кинетику обмена молекулами углекислого газа между атмосферой и океаном, они нашли, что среднее время жизни молекулы CO_2 в атмосфере, прежде чем она попадает в океан, составляет приблизительно десять лет.

Эта цифра – 10 лет, если она верна, означает, что большая часть углекислого газа, добавленного в атмосферу с начала эры индустриализации (то есть с конца XIX в.) до 1950-х гг., должна была полностью

поглотиться океаном. Казалось бы, можно сделать вывод, что значительного роста содержания CO_2 в атмосфере не должно быть.

Однако во второй части этой же статьи Ревелл разъясняет, что полученная цифра недостаточна для того, чтобы судить о реальной концентрации углекислого газа в атмосфере. Дело в том, что процесс абсорбции – чрезвычайно сложное явление, включающее несколько процессов, характеризующихся разными скоростями: обмен молекулами CO_2 между атмосферой и поверхностным слоем океана; химические реакции с участием новых порций растворенного CO_2 , изменение кислотного баланса в океанской воде и установление нового парциального давления углекислого газа над океаном; вертикальное перемешивание огромных масс океанской воды. И величина десять лет характеризует только первый из этих процессов.

Вместе с тем, поглощение новых порций углекислого газа океаном меняет характеристики самого океана, в частности увеличивает кислотность (уменьшает pH) океанской воды. Однако океан обладает свойствами буферного раствора, в котором действует механизм отрицательной обратной связи, стремящийся погасить увеличение кислотности. Этот механизм реализуется через цепочку химических реакций с участием углекислого газа, угольной кислоты, ионов карбонатов и их солей, в частности карбоната кальция. В результате происходит обратное выделение некоторого количества углекислого газа. Так что в итоге абсорбция происходит неполная, и парциальное давление CO_2 над океаном все же повышается⁵.

Авторы статьи перечислили также другие причины повышения содержания углекислого газа в атмосфере и в океане, кроме сжигания ископаемого топлива. Это поступление в океан все большего количества органики, при окислении которой тоже образуется CO_2 , и увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере из-за уменьшения его потребления растительностью вследствие сокращения площади лесов во многих районах планеты.

Ревелл и Зюсс констатировали, что количественно учесть все эти процессы на данный момент трудно и что прогноз на будущее существенно зависит от того, с какой скоростью будут расти объемы промышленного сжигания ископаемого топлива. Они обратили внимание на опасность экспоненциального роста и на основании довольно грубых оценок предсказали, что в этом случае к началу XXI в. количество углекислого газа, поступающего в атмосферу, достигнет двадцати процентов от уже содержащегося в атмосфере, а скорость поступления на два порядка превысит естественную эмиссию вулканов, гейзеров и других природных источников, что и наблюдается сейчас. Эта естественная эмиссия на протяжении всей предыдущей истории уравнивалась процессами выветривания и морской седиментации. Теперь же, возвращая в атмосферу и океан значительную часть ископаемого органического углерода, запасавшегося природой в течение сотен миллионов лет, челове-

⁵ Ревелл приводит формулу, описывающую зависимость парциального давления от констант диссоциации угольной кислоты. Аналогичная формула приведена и в работе Пласса. Авторы ряда более поздних исследований пришли к выводу, что океан поглощает приблизительно половину количества CO_2 , поступающего в атмосферу.

ство тем самым осуществляет гигантских масштабов геофизический эксперимент, подобных которому в истории не случалось. Полагая, что предвидеть исход этого эксперимента чрезвычайно важно, Ревелл и Зюсс в заключительной части статьи пишут о необходимости долговременного и точного мониторинга содержания углекислого газа в атмосфере и выражают надежду, что приближающийся Международный геофизический год даст возможность начать работу по такому мониторингу.

Как выяснилось, эту надежду Роджер Ревелл связывал с работой Чарльза Килинга.

Измерения содержания углекислого газа в атмосфере. Кривая Килинга



Чарльз Килинг
Charles David Keeling
1928–2005

В 1956 г. в Калифорнийском технологическом институте тогда еще молодой геохимик Чарльз Килинг (Charles David Keeling, 1928–2005) сконструировал установку, с помощью которой намеревался производить точные измерения содержания углекислого газа в атмосфере. Задача эта была отнюдь не тривиальной. Многие специалисты вообще скептически оценивали возможность точных измерений концентрации CO_2 в воздухе из-за зависимости локальных значений этой величины от множества факторов, таких как наличие или отсутствие растительности, степень удаленности от крупных населенных пунктов, а также из-за ее постоянных флуктуаций под влиянием изменений температуры, давления, силы и направления ветра и т. д. В свое время это было одной из причин недоверия метеорологов к данным, использованным Каллендером. Однако Килинг верил, что ему удастся достичь более высокой точности и надежности измерений, чем кому бы то ни было ранее.

Обстоятельства ему благоприятствовали. 1957–1958 гг. были объявлены Международным геофизическим годом (МГГ), и исследования типа задуманного Килингом в этот момент всячески приветствовались. Одним из научных центров, активно участвовавших в программе МГГ, был Институт океанографии Скриппс, и идеей Килинга и его аппаратурой заинтересовался Роджер Ревелл. Килинг был принят на работу, организовал группу и в 1958 г. приступил к измерениям. Сначала измерения проводи-

лись в нескольких районах – на базе Института Океанографии в Ла Хойе и других пунктах Калифорнии, затем в Антарктиде и на Гавайях. Со временем основной площадкой для измерений стала обсерватория на Гавайях, в горах Мауна Лоа (Mauna Loa).

С тех пор измерения не прерывались ни на час в самом буквальном смысле этого слова. Лаборатория в Мауна Лоа расположена вдали от населенных пунктов, промышленных предприятий и транспорта, на высоте более 3000 м над уровнем океана, постоянно продуваемой океанским ветром (что хорошо), однако в двух милях от вулкана (что не так хорошо). Концентрация углекислого газа измеряется с помощью инфракрасных газоанализаторов со специальной ловушкой для вымораживания паров воды. Процедура измерений, неоднократно описанная в публикациях Килинга с сотрудниками, все эти годы остается неизменной. Воздух непрерывно прокачивается через анализаторы, которые ежечасно выдают значение концентрации CO_2 . Средняя величина за день получается путем усреднения не меньше, чем за 6 часов непрерывной работы.

Чарльз Килинг умер в 2005 г. Однако измерения продолжают, группой руководит сын Килинга Ральф. Результаты измерений за 50 лет однозначно показывают рост концентрации углекислого газа [9]. С 1959 по 2008 г. содержание CO_2 в атмосфере выросло от 315,98 до 385,34 частей на миллион по объему, то есть на 22%. Другой важный факт, открытый группой Килинга, – повторяющиеся из года в год небольшие, но заметные сезонные осцилляции углекислого газа в атмосфере. Содержание углекислого газа падает летом, когда интенсивный рост растений сопровождается увеличением потребления CO_2 , и, наоборот, возрастает зимой, когда деревья сбрасывают листву, прекращается рост травы, цветов и другой растительности, и потребление CO_2 уменьшается.

Обе фундаментальные закономерности, обнаруженные Килингом, хорошо видны на графике временной зависимости концентрации углекислого газа, получившем название «кривой Килинга» (рис. 1). Эта кривая теперь воспроизводится во многих статьях и монографиях. Многие специалисты считают ее одним из важнейших достижений современной науки.

Килинг начинал свои исследования, находясь под впечатлением от работ Пласса; он встречался с Плассом, проявлял интерес к концепции антропогенного происхождения избыточного CO_2 и связанного с ним усиления парникового эффекта. Однако будучи экспериментатором, своей главной задачей Килинг считал не разработку тех или иных концепций, а точные измерения. Лишь в 1990-х гг. он окончательно поверил, что зарегистрированный им рост концентрации CO_2 обусловлен именно антропогенной эмиссией. Однако полученные им данные представляли научную ценность независимо от того, насколько верна или неверна концепция «глобального потепления». Углекислый газ – один из важнейших компонентов биосферы, и ценной является любая информация о происходящих с ним изменениях.

Вернемся, однако, к Ревеллу. После нескольких лет работы группы Килинга данные, полученные этой группой, окончательно убедили Ревелла в том, что содержание углекислого газа в атмосфере действительно возрастает, и сделали его сторонником, а затем и пропагандистом идеи о потеплении, вызванном

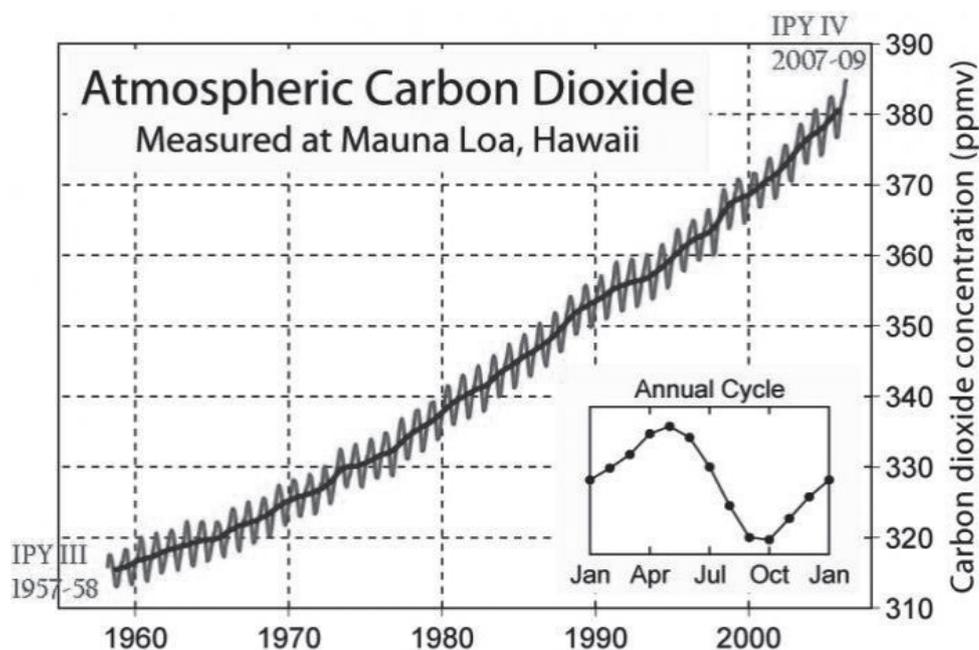


Рис. 1. Кривая Килинга (https://en.wikipedia.org/wiki/Keeling_Curve)

этим ростом. В 1963 г., покинув пост директора Института Скриппса, Роджер Ревелл отправился читать лекции в Гарварде. Там он с воодушевлением рассказывал студентам об этой проблеме и о последних результатах Килинга. Известно, что одним из студентов был сын сенатора от штата Теннесси Альберт Гор-младший. По собственному признанию Альберта Гора, именно тогда зародился его интерес к этой проблеме. Спустя тридцать лет он станет вице-президентом США и сделает борьбу с грядущим потеплением и агитацию за снижение эмиссии углекислого газа одним из центральных пунктов своей политической программы, напишет на эту тему несколько книг и по одной из них поставит фильм (Inconvenient Truth, Неудобная Правда). В 2007 г. эта активность принесет ему Нобелевскую премию мира.

К сожалению, одним из следствий кипучей деятельности Альберта Гора оказался повышенный ажиотаж, усилившаяся поляризация мнений вокруг проблемы «глобального потепления» и ее политизация. Гор – одна из одиозных фигур в американской политической элите, у него много оппонентов и недоброжелателей. Поэтому, хотя часть американцев поверила в серьезность угрозы изменения климата, другая часть свое скептическое или негативное отношение к личности Альберта Гора перенесла на пропагандируемую им теорию антропогенного потепления. Более того, в США распространилось мнение, что угрозу глобального потепления вообще выдумали А. Гор сотоварищи. И, хотя очевидно, что бывший вице-президент не мог быть ни первооткрывателем природного явления, если таковое существует, ни автором научной концепции, а лишь пропагандистом, подобное мнение оказалось весьма живучим. Его можно встретить не только в американских, но и в российских средствах массовой информации, причем иногда его озвучивают авторитетные и уважаемые ученые. Безусловно, этому способствовало присуждение Гору Нобелевской премии, хотя опять-таки следует помнить, что это премия не по физи-

ке или химии, а «премия мира», которая дается за политику, в данном случае за пропаганду. Она была присуждена с формулировкой «за усилия по накоплению и распространению знаний о вызванных человеком изменениях климата и создание основ для мер по противодействию таким изменениям», из которой следует, что Нобелевский комитет вовсе не считал Гора автором концепции антропогенного потепления. Уместно напомнить также, что Гор получил премию не единолично, а вместе с другими членами Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Среди них был российский академик Ю.А. Израэль, но его высказывания по проблеме глобального потепления всегда были осторожными и дипломатичными.

Заметим также, что Альберт Гор был не единственным и не самым первым из известных политиков и государственных деятелей, отнесшихся всерьез к угрозе глобального потепления. Вероятно, самой первой была Маргарет Тэтчер. Во всяком случае, еще в сентябре 1988 г., выступая на заседании Королевского общества Великобритании, она призвала британских ученых заняться исследованием этой проблемы, и правительство Тэтчер финансировало эти исследования. В 1989 г. Тэтчер сочла нужным затронуть эту тему, выступая в ООН.

Заключение

В заключение еще раз остановимся на нескольких важных понятиях и терминах.

1. В настоящей статье, как и в предыдущей [1], речь идет об усилении парникового эффекта земной атмосферы из-за человеческой деятельности. Основной вклад в повышение уровня двуокиси углерода в атмосфере дают сжигание углеводородного топлива, а также сокращение площади лесов.

2. Напомним при этом, что углекислый газ не является единственным парниковым газом. Наибольший вклад в парниковый эффект дают пары воды, однако концентрация паров воды в атмосфере не зависит

от человеческой активности и всецело определяется температурой мирового океана или локальных водоемов. В то же время, как мы видели, содержание углекислого газа в атмосфере в течение двадцатого века постоянно и существенно увеличивалось. Что касается других парниковых газов (метан, окислы азота, фреоны и др.), то во времена, когда выполнялись исследования, описанные в Частях 1 и 2, их концентрация в атмосфере и вклад в парниковый эффект были столь малы по сравнению с углекислым газом, что во внимание не принимались. В последующие годы, однако, концентрация этих газов в атмосфере значительно увеличилась, и в настоящее время вопрос об их вкладе в парниковый эффект становится более актуальным. Этого вопроса мы еще коснемся в Части 3.

3. Рост концентрации парникового газа (то есть газа, способного поглощать ИК излучение Земли), вызванный человеческой деятельностью (как и иными причинами), должен приводить к усилению парникового эффекта, соответственно к увеличению средней температуры земной поверхности, то есть к потеплению. В семидесятых годах появился и начал широко употребляться термин глобальное потепление. Изначально подразумевалось, что термин относится к потеплению, вызванному именно антропогенным усилением парникового эффекта. Однако в

принципе глобальное потепление может быть вызвано иными процессами, например, изменением мощности потока солнечной радиации. Поэтому в наших статьях, во избежание недоразумений, мы, как правило, этим термином не пользуемся, предпочитая терминологию, которая ясно указывает на конкретный природный механизм потепления.

4. Публикации, в которых констатировалось или предсказывалось изменение климата Земли в сторону потепления из-за антропогенного усиления парникового эффекта, нередко наталкивались, да и сейчас наталкиваются, на возражения. Авторы возражений обычно настаивают на незначительном влиянии изменений парникового эффекта и указывают на возможность потепления, не связанного с человеческой деятельностью. Хотя обзор всех известных природных явлений, влияющих на климат, и соответствующих им климатологических теорий выходит за рамки нашей задачи, в Части 3 будут коротко описаны те из них, к которым чаще всего апеллируют как к альтернативе усилению парникового эффекта. В дальнейшем мы также постараемся изложить актуальные в настоящее время взгляды наиболее известных сторонников и оппонентов концепции изменения климата из-за антропогенного повышения уровня парниковых газов.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Шрайбер ВМ. Из истории исследований парникового эффекта земной атмосферы. Биосфера. 2013;(5):37-46.

Общий список литературы/Reference List

1. Shrayber VM. [On the history of studying the greenhouse effect of Earth's atmosphere]. Biosfera. 2013;(5):37-46. (In Russ.)

2. Ångström K. Über die Bedeutung des Wasserdampfes und der Kohlensäure bei der Absorption der Erdatmosphäre / Annalen der Physik. 1900;4:720-32.

3. Arrhenius S. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. Philosophical Magazine. 1896;41:237-76.

4. Arrhenius S. Worlds in the Making: The Evolution of the Universe. New York; Harper & Brothers; 1908.

5. Callendar GS. The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature. Quart J Roy Meteorol Soc. 1938;(64):223-40.

6. Fleming JR. The Callendar Effect. (The Life and Work of Guy Stewart Callender). American Meteorological Society; 2007.

7. Fourier J. Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires. Annales de Chimie et de Physique Ser 2. 1824;27:136-67.

8. Kaempffert W. Warmer climate on the Earth may be due to more carbon dioxide in the air. New York Times, 1956, Oct 28.

9. Keeling RF, Piper SC, Bollenbacher AF, Walker JC. Atmospheric Carbon Dioxide Record from Mauna Loa. La Jolla: Scripps Institution of Oceanography, University of California; 1958-2008.

10. Plass GN, Fivel DI. A method for the integration of the radioactive-transfer equation. J. Meteorol. 1955;12:191-200.

11. Plass GN. The carbon dioxide theory of climatic change. Tellus. 1956;8:140-54.

12. Plass, GN. Carbon dioxide and the climate. Amer Scientist. 1956;4:302-16.

13. Revelle R, Suess HE. Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase of Atmospheric CO₂ during the past decades. Tellus. 1957;9:18-27.

14. Revelle R. Carbon dioxide and world climate. Scientific Amer. 1982;247(2):35.

15. Tyndall J. On the absorption and radiation of heat by gases and vapors, and on the physical connection of radiation, absorption and conduction. Phil Transact. 1861;(Feb.).