

ИЗ ИСТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЙ ПАРНИКОВОГО ЭФФЕКТА ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ

В.М. Шрайбер

«Балаш Наноанализис», Фремонт, Калифорния (США)

Эл. почта: vmshrayber@yahoo.com

Статья поступила в редакцию 17.11.2012; принята к печати 05.02.2013

В статье описан самый ранний период истории исследований парникового эффекта земной атмосферы и обстоятельства возникновения концепции усиления парникового эффекта из-за антропогенной эмиссии углекислого газа. Основными вехами описываемого периода являются открытие явления парникового эффекта (Фурье, 1824 год); обнаружение способности паров воды и углекислого газа поглощать инфракрасное излучение (Тиндаль, 1859 год); первый расчет изменения температуры Земли с изменением содержания углекислого газа в атмосфере и гипотеза о возможности повышения температуры планеты в результате человеческой деятельности (Аррениус, 1896 год); публикация первой работы, где утверждалось, что потепление климата, которое Аррениус гипотетически допускал, уже реально происходит (Каллендер, 1938 год). Описаны идеи, которыми руководствовались эти исследователи. Отражена роль ряда других персонажей этой истории. Разъясняются физические основы парникового эффекта и роль спектральных характеристик атмосферных газов.

Ключевые слова: парниковый эффект, углекислый газ, глобальное потепление.

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

V.M. Shrayber

Balazs NanoAnalysis, Fremont CA., USA

E-mail: vmshrayber@yahoo.com

The paper addresses the earliest steps of studying the greenhouse effect of the atmosphere with special attention to the origin of the concept of anthropogenic carbon dioxide emissions as a factor of increase in the effect. The hallmarks of the story include greenhouse effect discovery by J. Fourier (1824), the recognition that water vapor and carbon dioxide are able to absorb the infrared radiation (J. Tyndall, 1859), the first attempt to calculate changes in Earth temperature based on changes in carbon dioxide content in Earth atmosphere and the first hypothesis that Earth temperature may rise because of anthropogenic factors (S. Arrhenius, 1896), and the publication of the first paper claiming that climate warming, which was hypothesized by S. Arrhenius, does take place (G. Callendar, 1938). The ideas that guided these researchers and the roles of some other personalities are described. The paper is supplemented with an explanation of the physical basis of greenhouse effect with emphasis on the role of the spectral characteristics of atmospheric gases.

Keywords: greenhouse effect, carbon dioxide, global warming.

Температура планеты и ее климат оказывают настолько сильное влияние на человеческую жизнь и на состояние всей биосферы в целом, что появление любой новой климатической теории или концепции неизбежно привлекает к себе пристальное внимание широкого круга специалистов – метеорологов, климатологов, экологов, специалистов по геофизике и физике атмосферы. Но, пожалуй, ни одна климатическая или экологическая теория не вызывала в последние десятилетия столь повышенного общественного интереса, столько дискуссий и разногласий, сколько концепция повышения температуры Земли из-за антропогенной эмиссии парниковых газов, в частности углекислого газа. Полемика вокруг этой концепции началась буквально с момента ее появления на свет более ста лет назад. В 1970-х – начале 1980-х годов полемика вышла за пределы профессионального сообщества¹ и не утихает по сей день. Сложилась странная, может быть, даже беспрецедентная ситуация. С одной стороны, заключены и ряд лет уже действуют международные соглашения о снижении

антропогенной эмиссии двуокиси углерода, в частности Киотский протокол; с другой – сохраняются сомнения в целесообразности борьбы с этой эмиссией и продолжают появляться публикации в средствах массовой информации и на интернет-сайтах, где утверждается, что повышение содержания углекислого газа в атмосфере практически не оказывает влияния на климат. Постепенно меняется характер дискуссий, чисто научные аспекты отступают на второй план, а на первый выдвигаются политические, экономические и даже моральные.

Ясно, что поставить точку в споре о том, верна или ошибочна концепция, могут только дальнейшие исследования. Однако важно и интересно было бы понять причины живучести и самой концепции, и сопровождающих ее сомнений. По мнению автора настоящих заметок, в подобной ситуации может быть полезно обратиться к истории вопроса, тем более что история возникновения и формирования концепции, особенно ее ранний этап, довольно скупо освещалась в литературе, а в русскоязычной литературе и вовсе не освещалась. В лучшем случае можно встретить лаконичное упоминание имени Сванте Аррениуса, опубликовавшего в 1896 г. ги-

¹ Примерно тогда же появился и термин «глобальное потепление» (Global Warming) [5].

потезу о возможности потепления из-за увеличения содержания углекислого газа в атмосфере [3]. Что привело Аррениуса к этой идее, какие были у него для этого основания – не обсуждается, хотя ясно, что идея не могла возникнуть на пустом месте. Вне поля зрения остаются имена тех, кто в последующие несколько десятилетий, работая в русле аррениусовской идеи, развивал и дополнял ее, так что в 1970-х гг. она превратилась уже в концепцию, хоть и не завершенную с сегодняшней точки зрения, вызывающую споры и сомнения, но все-таки концепцию.

Настоящая статья написана с целью восполнить этот пробел.

Открытие парникового эффекта. Жан Жозеф Фурье и Джон Тиндаль

Попытки понять взаимосвязь температуры Земли с составом ее атмосферы имеют долгую историю. За точку отсчета мы примем статью знаменитого французского математика и физика Жана Батиста Жозефа Фурье, опубликованную в 1824 г. [11]. В этой работе впервые была сформулирована идея парникового эффекта, создаваемого земной атмосферой.

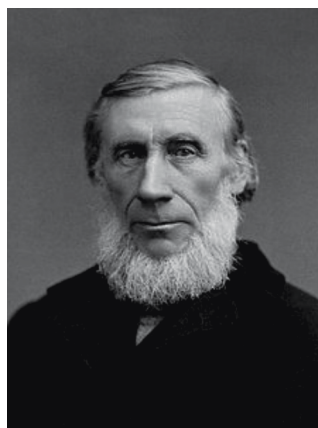
Фурье больше известен своим вкладом в математику. Любопытно, что человек, имевший хоть какое-то отношение к точным наукам, слышал о рядах Фурье, о преобразовании Фурье, об уравнении Фурье и т.д. Как физик Фурье интересовался вопросами теплопроводности и теплообмена. Размышляя о том, чем определяется температура Земли, Фурье пришел к выводу, что Земля, нагретая излучением Солнца, также излучает тепло в пространство, и температура Земли определяется балансом приходящего и излучаемого потоков. Фурье еще не использовал термин «инфракрасное излучение», хотя оно уже было открыто Вильямом Гершелем в 1800 г., и называл излучение Земли «*chaleur obscure*» («невидимое тепло»).

Вместе с тем, из расчетов Фурье следовало, что небесное тело, не имеющее атмосферы и находящееся на таком 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, которая пропускает излучение Солнца, поглощает часть *chaleur obscure*, тем самым задерживая его и повышая температуру Земли. Этот эффект повышения температуры поверхности планеты благодаря наличию атмосферы был назван «парниковым эффектом» (*greenhouse effect* в англоязычной литературе), на основании аналогии с обычным парником, повышение температуры в котором обеспечивается наличием крыши, сделанной из стекла, прозрачной для солнечных лучей, но задерживающей тепло. Иными словами, Фурье сообщил нам, что все мы живем в гигантском парнике, своеобразной крышей которого является атмосфера Земли.

Характерной особенностью почти всех открытий и достижений Фурье является их широкое практическое применение в современной науке и технике. Вот пример: лучшие современные приборы для получения инфракрасных спектров поглощения и испускания называются фурье-спектрометрами. Название связано с тем, что основным узлом такого прибора является интерферометр, а спектр получается путем фурье-преобразования интерферограммы. Повсеместный переход от классических приборов с



Жан Батист Жозеф Фурье



Джон Тиндаль

призмой или дифракционной решеткой к фурье-спектрометрам произошел во второй половине XX века и многократно расширил возможности и увеличил эффективность спектроскопии как метода. Есть нечто символическое в том, что именно фурье-спектрометры используются сейчас для исследования инфракрасных спектров атмосферных, в том числе парниковых газов.

Однако в 1824 г. Фурье еще не знал, какие именно газы в составе атмосферы поглощают инфракрасное излучение. Спустя четверть века – в 1859 г. – это выяснил Джон Тиндаль. Ирландец по происхождению, большую часть жизни он провел в Англии, где с 1853 г. по 1887 г. занимал должность профессора физики в Королевском Институте. В 1867 г. он сменил Фарадея на посту директора этого Института и оставался в этой должности до 1887 г. В эти годы Джон Тиндаль был весьма популярной личностью. Он считался одним из лучших физиков-экспериментаторов своего времени. Он изобрел, разработал и усовершенствовал целый ряд измерительных приборов и выполнил множество экспериментальных работ в различных областях физики.

Наибольшую известность получили его исследования рассеяния света в мутных средах – коллоидных растворах, эмульсиях, суспензиях (тиндалевское рассеяние). Тиндаль был первым, кто объяснил голубой цвет неба². Однако не в меньшей степени он прославился как блестящий лектор, педагог и просветитель.

² Объяснение оказалось не совсем точным, но основная идея была верной.

³ Его именем названы один из ледников в Чили и горные пики в Калифорнии и Тасмании.

На его лекциях в Королевском Институте аудитория обычно была переполнена. То же самое происходило и во время его поездки с лекциями по Америке. Он написал ряд книг по различным разделам физики, получивших высокую оценку таких выдающихся современников, как Максвелл и Гельмгольц.

В связи с идеей Фурье о парниковом эффекте, Тиндаль изучал прохождение инфракрасного излучения через различные газы и обнаружил, что некоторые газы обладают способностью поглощать это излучение. В частности, оказалось, что такой способностью обладают пары воды и углекислого газа [13]. Это открытие наполнило конкретным содержанием идею Фурье: стало ясно, какие именно компоненты земной атмосферы поглощают тепловое излучение Земли и отвечают за парниковый эффект.

Как и многие естествоиспытатели того времени, Тиндаль был человеком разносторонним и любознательным. Помимо физики, он интересовался геологией, был прекрасным альпинистом, совершил несколько рекордных восхождений в Альпах и вел наблюдения за состоянием ледников³. У него появилась идея, что возникновение ледникового периода миллионы лет назад, а затем таяние огромных масс льда 10 000 лет назад было связано с изменениями парникового эффекта, а следовательно, и температуры, из-за изменения содержания углекислого газа в атмосфере. Правда, мысль о том, что увеличение концентрации CO_2 из-за сжигания углеродного топлива в человеческих жилищах и промышленных предприятиях того времени может вызвать существенное потепление, ему в голову не приходила. Первым, кто публично высказал такую мысль, был шведский ученый Сванте Аррениус.

Гипотеза Сванте Аррениуса

Сванте Аррениус – один из основоположников современной физической химии. Особенно велик его вклад в теорию электролитической диссоциации и в исследования химических реакций в растворах электролитов. Эти работы принесли ему Нобелевскую премию по химии за 1903 г. Аррениус был, по-видимому, первым, кто ввел в химию чрезвычайно важное представление об энергии активации химической реакции. Соответственно, формулу, описывающую экспоненциальную зависимость константы скорости реакции от температуры с энергией активации в показателе экспоненты, часто называют уравнением Аррениуса.

В 1896 г. в журнале *Philosophical Magazine* Аррениус опубликовал работу “On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground” [3]. В этой работе, задавшись простой стационарной и равновесной моделью системы (Земля + атмосфера), он выполнил расчет вариации температуры Земли на различных широтах при вариации содержания углекислоты в атмосфере. Слова «простая модель» не должны вводить в заблуждение. Для работы вручную это были трудные и громоздкие расчеты. Аррениус разбил поверхность Земли от 70° северной широты до 60° южной широты на малые сегменты и для каждого такого сегмента рассчитывал падающий и испускаемый поток излучения для дневного и ночного времени, для четырех сезонов и четырех различных концентраций углекислого газа. Для расчетов нужны были данные об оптическом пропускании атмосферы,

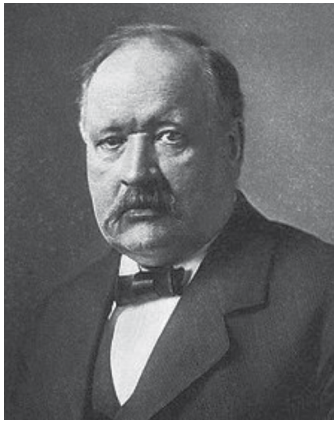
о спектре инфракрасного излучения Земли, о распределении среднемесячных температур по широтам, о доле радиации, отражаемой земной поверхностью и т.д. Аррениус постарался использовать новейшие для того времени данные, однако впоследствии, разумеется, выяснилось, что часть этих данных неточна. Критики его работы отмечали ряд важных факторов, которые он не принял во внимание. Например, полагая, что при увеличении концентрации углекислого газа и соответствующем небольшом повышении температуры происходит увеличение испарения воды, что, в свою очередь, приводит к еще большему повышению температуры, он не учитывал, что при повышении влажности пары воды конденсируются, образуются облака, а это увеличивает рассеяние солнечного света и ведет к снижению температуры.

Аррениус писал, что причиной, побудившей его взяться за столь трудоемкие расчеты, были дискуссии на заседании Физического общества Стокгольма о природе ледникового периода. То есть мотив, по сути, тот же, что и у Тиндаля, – выяснить, может ли изменение состава атмосферы быть причиной образования или таяния ледников. Из расчетов следовало, что при уменьшении концентрации CO_2 в два раза средняя температура Европы снизится на $4\text{--}5^\circ\text{C}$, и наоборот, удвоение содержания углекислого газа может вызвать повышение температуры примерно на такую же величину. Изменения температуры такого порядка уже достаточны, чтобы вызывать гигантские изменения ледового покрова. При этом расчеты предсказывали более значительные изменения в северном полушарии.

Чтобы прояснить вопрос о принципиальной возможности значительных изменений концентрации углекислого газа в атмосфере, Аррениус привлек к участию в работе профессора Арвида Хогбома (Arvid Hogbom), который был специалистом по геохимии углерода. Они пришли к выводу, что изменения возможны, поскольку из расчетов Хогбома следовало, что общее количество углекислоты, запасенной в известняке и других осадочных породах Земли, в десятки тысяч раз превосходит ее содержание в атмосфере. Более того, Хогбом полагал, что подобные изменения уже неоднократно происходили в истории Земли и что поступление углекислоты в атмосферу могло происходить за счет 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.

В процессе обсуждений Арвиду Хогбому пришла в голову экстравагантная идея: оценить количество двуокиси углерода, выбрасываемой в атмосферу при сжигании угля и другого топлива на промышленных предприятиях того времени. Он получил величину, сопоставимую с теми, которые поглощаются или испускаются при естественных геологических процессах. Она составляла примерно одну тысячную часть от количества, уже содержащегося в атмосфере. Так что они с Аррениусом пришли к заключению, что лет эдак через 3000 это может привести к повышению температуры на Земле на те же самые 5°C , о чем Аррениус и написал в статье.

Аррениус, по-видимому, отдавал себе отчет в грубо-приблизительном характере расчетов и рассматривал результаты не как доказательство реальной



Сванте Аррениус

опасности, грозящей человечеству, 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 три тысячи, а через несколько сот лет. Эти предполагаемые изменения он склонен был рассматривать как положительное явление, способное предотвратить или отодвинуть наступление очередного ледникового периода.

Первые сторонники и оппоненты. Разочарование и забвение

Гипотезу Аррениуса и Хогбома поддержал их стокгольмский коллега – известный работами по изучению движения облаков метеоролог Нильс Экхолм (Nils Gustaf Ekholm), возглавлявший шведскую геофизическую экспедицию на Шпицберген, а в дальнейшем избранный директором Центрального метеорологического бюро Стокгольма. В 1901 г. он оптимистично писал [8], что в будущем, меняя количество сжигаемого угля и регулируя рост растений, человек сможет целенаправленно влиять на содержание углекислоты в атмосфере, устанавливая желательный температурный режим планеты и избежать наступления новых ледниковых периодов.

Идея о влиянии концентрации углекислоты на процессы формирования и таяния ледников все-речь заинтересовала также американского геолога и гляциолога Томаса Чемберлена (T.C. Chamberlin). Он возглавлял геологическое отделение Чикагского университета, был основателем «Американского Журнала Геологии», автором ряда учебников и монографий, а также составителем детальной карты расположения ледников на территории Северной Америки. Кроме ледников, его волновали проблемы происхождения Земли и Луны и формирования атмосферы, смена геологических эпох, история появления гор и океанов, причины колебания температуры и влажности. Чемберлен был убежден, что все эти явления взаимосвязаны. Гипотеза Аррениуса, предлагавшая принципиально новое объяснение смены ледниковых и теплых эпох как следствия изменения состава атмосферы, естественно встраивалась в систему его взглядов. Он включил ее в курсы своих лекций и, по существу, стал ее пропагандистом [9].

Между тем довольно скоро после публикации Аррениуса – в 1900 г. – появилась статья, в которой утверждалось, что выводы Аррениуса о влиянии

углекислого газа на климат Земли ошибочны. Автором статьи был другой шведский ученый – профессор Кнут Ангстрем (Knut Angström)⁴ из университета города Упсала.

Ангстрем занимался измерением поглощения инфракрасного излучения в кювете, заполненной смесью паров воды и углекислого газа [2]. Выводы, сделанные им на основе этих измерений, оказались весьма неутешительными для Аррениуса. Во-первых, Ангстрем утверждал, что вода и углекислый газ поглощают практически в одной и той же спектральной области; и поскольку концентрация воды больше, то прибавка небольшого количества углекислого газа мало что изменит. А во-вторых, пересчитав свои результаты на условия, соответствующие атмосферным, то есть на толщину слоя атмосферы и концентрации в ней воды и CO₂, он обнаружил, что в области полос поглощения этих газов все проходящее излучение должно полностью поглощаться уже при нынешнем их содержании в атмосфере. Ну а коль скоро и так поглощается 100%, то добавление еще какого-то количества углекислого газа вообще ничего уже не изменит. Иными словами, Ангстрем пришел к заключению, что парниковый эффект при нынешнем составе атмосферы является *насыщенным*, и колебания количества углекислоты не могут привести к заметному изменению парникового эффекта и температуры планеты, а следовательно, не могут быть причиной наступления ледниковой эры или, наоборот, ее окончания.

Когда Чемберлен узнал о выводах Ангстрема, он был страшно разочарован и горько сожалел о том, что доверился авторитету Аррениуса. До конца жизни – он умер в 1928 г. – Чемберлен считал себя жертвой аррениусовской ошибки. Он писал об этом в письмах друзьям и коллегам. Постепенно и другие ученые отвернулись от работы Аррениуса. Казалось, что интерес к проблеме влияния углекислого газа на климат Земли окончательно утрачен, а идея Аррениуса тихо упокоилась на библиотечной полке.

Эффект Каллендера

Однако в конце 1930-х гг. идея Аррениуса неожиданно ожила и начался новый виток связанной с ней истории. В роли возмутителя спокойствия выступил английский инженер и исследователь по имени Гай Стюарт Каллендер (Guy Stewart Callendar) [10].

Отец Гая Каллендера – Хью Каллендер – возглавлял кафедру физики в Университете Мак-Гилл в Монреале, где прославился созданием первой в Канаде рентгеновской установки и получением первых рентгеновских снимков, а также другими техническими изобретениями. Популярность его в монреальских научных кругах была настолько велика, что, когда он покинул Канаду, чтобы занять должность профессора в университетском колледже в Лондоне, сменивший его в Монреале молодой Эрнст Резерфорд писал домой, как трудно ему завоевывать авторитет после столь успешного предшественника.

Каллендер-младший начал свою деятельность с того, что ассистировал отцу в лаборатории. Затем в течение ряда лет занимался исследованиями свойств водяного пара в широком диапазоне давлений и тем-

⁴ Этот Кнут Ангстрем доводился сыном тому Ангстрему, по имени которого была названа единица измерения длины волны в оптике.

ператур. В тридцатых годах Каллендер познакомился с работами Тиндала и Аррениуса. Гипотеза Аррениуса произвела на него большое впечатление, и он задался целью ее проверить. Он оказался человеком настойчивым и целеустремленным. Достаточно сказать, что в своем доме на собственные средства он устроил метеорологическую станцию и в течение многих лет регулярно вел и регистрировал наблюдения. Главное же, что он сделал, состояло в следующем [6].

Во-первых, он проанализировал имеющиеся данные об углеродном цикле и пришел к выводу, что содержание углекислого газа в атмосфере повысилось от 292 миллионных долей (parts per million, ppm) в 1900 г. до 310 ppm в 1936 г. (т.е. ~ на 6%) и что эта разница близка к количеству CO_2 , выделившегося при сгорании углеводородного топлива за этот же период. Во-вторых, он собрал и систематизировал данные измерений температуры на двухстах метеорологических станциях в различных районах Земли приблизительно за полвека (с 1880 г. по 1930 г.) и пришел к заключению, что в течение этого периода температура Земли ежегодно повышалась в среднем на 0,005 градуса.

Однако обнаружить одновременный рост температуры и концентрации углекислого газа – это полдела. Надо было еще доказать, что первое является следствием второго. Для этого Каллендеру пришлось обратиться к вопросу о поглощении и испускании инфракрасной радиации, тому самому, анализируя который Ангстрем подверг уничтожительной критике работу Аррениуса.

У Ангстрема, как мы отмечали, было два «убийственных» аргумента: 1) полосы паров воды и углекислого газа в инфракрасной области полностью перекрываются; 2) уже при нынешнем содержании этих газов в атмосфере имеет место полное поглощения ИК-радиации, а потому прибавка углекислого газа ничего не изменит. Однако с тех пор ситуация заметно изменилась. 1920-е – 1930-е годы были отмечены заметным прогрессом в области теории молекулярных спектров, и спектры ряда молекул были исследованы на аппаратуре с гораздо более высоким спектральным разрешением, чем во времена Аррениуса и Ангстрема. Каллендер уже знал, что по крайней мере первый из двух названных аргументов не соответствует действительности: полосы паров воды и углекислого газа, как оказалось, полностью не перекрываются; есть области спектра, где углекислый газ поглощает сильнее, чем вода, а есть и такие, где сравнительно мало поглощение обоих газов.

Что касается второго аргумента Ангстрема, то расчеты, в ходе которых доказывалось, что этот аргумент на самом деле тоже неточен, появились позднее (например в [12]). В этих расчетах учитывалось различие между традиционным лабораторным экспериментом по измерению поглощения и процессом распространения земного излучения сквозь атмосферу. В лабораторном эксперименте через кювету с образцом газа проходит световой поток от внешнего источника, температура которого намного выше температуры образца, так что излучением самого образца, нагретого проходящим светом, можно пренебречь, в крайнем случае – учесть как малую поправку. В системе (Земля + атмосфера) роль образца играет атмосфера, имеющая температуру, соизмеримую с температурой источника – Земли. Слой атмосферы,



Гай Стюарт Каллендер

поглотивший полностью или частично проходящее излучение, нагревается и сам становится источником излучения для следующего слоя. Процесс такого типа обычно называют не поглощением (или пропусканием) излучения, а термином «перенос излучения» (radiation transfer). Подход к анализу подобных процессов был дан в работе известного астрофизика Карла Шварцшильда (уравнение Шварцшильда). При таком «послойном» рассмотрении оказывается, что добавка парникового газа должна приводить к некоторому увеличению суммарного поглощения даже в области максимумов полос этого газа, где лабораторный эксперимент покажет 100% поглощения (пояснение см. далее).

Судя по всему, Каллендер этого не знал. Однако, не опровергая второй аргумент Ангстрема, он, можно сказать, обошел его. Он избрал такую схему расчетов, при которой вычислял не количество тепла, поглощенное атмосферой, а так называемое «инфракрасное излучение неба» (sky radiation)⁵. При этом, что важно, он тоже мысленно разбивал атмосферу на слои и считал, что при прохождении потока излучения слой, поглотивший порцию излучения и нагретый ею, становится источником излучения для следующего слоя и т.д.

Используя свои данные о приросте содержания углекислого газа, Каллендер вычислил соответствующее этому приросту увеличение «инфракрасного излучения неба», а с помощью этой величины рассчитал прирост температуры, который составил около 0,003 °C в год, что находится в удивительно хорошем количественном согласии с приведенной выше величиной 0,005 °C. Однако точность измерений «излучения неба» вообще (а в то время – в особенности) вряд ли могла быть высокой, как и точность использованных Каллендером значений коэффициентов поглощения углекислого газа. Так что указанное согласие представляется скорее случайным.

Все эти данные Каллендер изложил в статье [6]. Эта работа стала первой, где утверждалось, что потепление климата, которое Аррениус лишь гипотетически допускал, уже реально происходит и что рост температуры коррелирует с ростом содержания

⁵ Под «излучением неба» Каллендер и некоторые другие исследователи понимали величину потока инфракрасной радиации, направленного вниз на Землю, в условиях, исключающих прямое излучение Солнца.

углекислого газа. Вероятно, поэтому усиление парникового эффекта за счет антропогенного выброса CO₂ в атмосферу некоторые авторы стали называть «эффектом Каллендера».

Сообщение Каллендера на заседании Королевского метеорологического общества о результатах его работы было встречено весьма прохладно. Ему был задан ряд вопросов, ясно показавших недоумение и недоверие членов этого общества, большинство которых не понимало физических основ парникового эффекта, но зато лучше Каллендера владело конкретной климатологической информацией и хорошо понимало, насколько сложным объектом является атмосфера Земли и как много процессов, происходящих в ней, осталось за пределами чрезвычайно упрощенной схемы Каллендера, и потому не верило в точность приведенных в работе количественных оценок. Часть метеорологов основной причиной климатических изменений на Земле считала циклические изменения расстояния от Земли до Солнца⁶.

Джеймс Флеминг – автор книги о Каллендере [10] – пишет, что, размышляя о причинах скептического отношения многих метеорологов к идее антропогенного изменения климата, Каллендер называет четыре причины:

1) Идея одного-единственного, легко объясняемого фактора, способного вызывать всемирное изменение климата, кажется невероятной тем, кто знаком со сложными силами, от которых зависит климат.

2) Мысль о том, что человеческая деятельность может существенно повлиять на столь сложную систему, для многих неприемлема.

3) Большинство метеорологов не изучило проблему до такой степени, которая требуется, чтобы о ней судить, а также пользовалось неверными экспериментальными данными о спектре поглощения паров воды.

4) Подобная идея никогда не приходила в голову им самим.

Скепсис окружающих Каллендера не остановил. В 1939 г. он публикует статью, в которой описывает цикл углерода в атмосфере на протяжении веков, исследуемых геологами. В 1941 г. публикует обзор спектроскопических измерений парниковых газов – углекислого газа, воды, закиси азота и озона. В 1949 г. появляется его статья с многозначительным вопросом в названии «Can Carbon Dioxide Influence Climate?» и, естественно, положительным ответом на этот вопрос [7].

Каллендер не считал зарегистрированное им потепление вредным или опасным явлением. Наоборот, он полагал, что небольшое повышение температуры может улучшить климат северного полушария и способствовать расширению областей выращивания овощей и фруктов. Более того, он писал, что это потепление в будущем может задержать на неопределенное время наступление очередного ледникового периода, а это, конечно, тоже благо. Длительное время он защищал свою позицию практически в одиночку. Кто-то из журналистов уже в наши дни сказал о Каллендере: «A lone voice in the greenhouse (одинокий голос в парнике)».

⁶ Так называемые циклы Миланковича – периодические изменения параметров гелиоцентрической орбиты Земли, вследствие которых меняется величина потока падающего на Землю солнечного излучения.

Каллендер был растерян и глубоко опечален, когда в начале 1950-х гг. отстаиваемое им потепление неожиданно сменилось волной похолодания, между тем как эмиссия углекислого газа продолжала возрастать. Вскоре он умер. Однако его работы сделали свое дело. Джинн глобального потепления (я имею в виду не явление природы, а научную гипотезу) вырвался из бутылки. Спустя десяток лет он найден приют в лабораториях нескольких американских университетов, при финансовой поддержке военно-морского ведомства США.

Кое-что о парниковом эффекте

В заключение уточним некоторые факты, необходимые для понимания физических основ простейшей версии парникового эффекта земной атмосферы, базирующейся на работах Фурье, Тиндаля и Аррениуса, и дополним ее лишь минимумом более современной информации.

Любое тело с температурой, отличной от абсолютного нуля, испускает электромагнитное излучение. Положение максимума интенсивности этого излучения зависит от температуры. Максимум излучения Солнца, яркостная температура поверхности которого приблизительно равна 5780 К, находится в видимой области спектра (длина волны ~ 0,5 мкм). В этой области атмосфера практически прозрачна, и значительная часть солнечных лучей достигает земной поверхности, поглощается ею и нагревает ее⁷. Земля, в свою очередь, также отдает энергию путем излучения; однако температура Земли в среднем всего около +15 °С (или 288 К), поэтому максимум ее излучения смещен в инфракрасную область (длина волны ~ 15 мкм). И это излучение уже сильно поглощается атмосферой. По современным оценкам, не будь парникового эффекта, температура Земли была бы приблизительно –18 °С (255 К), то есть на ~ 33° ниже нынешней. Примерный вид спектров излучения Солнца и Земли иллюстрирует рисунок, где показаны рассчитанные спектральные кривые испускания абсолютно черного тела при температурах Солнца и Земли (рис. 1).

В настоящее время земная атмосфера содержит в заметных количествах следующие газы:

Азот	78,08%
Кислород	20,95%
Пары воды	1 ÷ 4%
	(вблизи поверхности)
Аргон	0,93%
Углекислый газ	0,039%
Неон	0,0018%
Гелий	0,0005%
Метан	0,00018%
Водород	0,00005%
Окислы азота	0,00003%
Окись углерода (CO)	0,00001%
Озон	0,000007%

В еще меньших количествах присутствуют окислы серы и фторхлоруглероды (фреоны).

Вклад того или иного газа в парниковый эффект определяется не только его концентрацией, но и тем,

⁷ Другая часть солнечного излучения рассеивается облаками, аэрозолями, пылью или отражается земной поверхностью (так наз. альбедо).

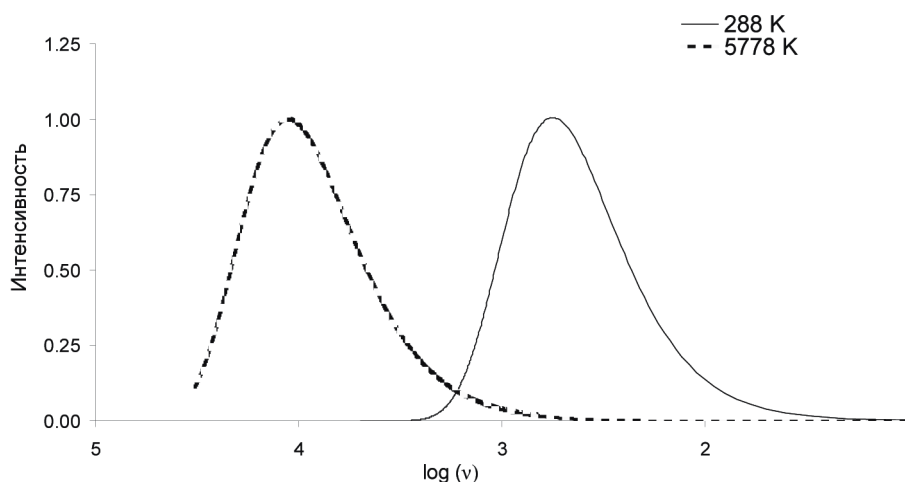


Рис. 1. Спектральное распределение интенсивности излучения абсолютно черного тела при температурах Земли (288 К) и Солнца (5778 К); ν – волновое число, равное $1/\lambda$, где λ – длина волны (см). Для удобства шкала абсцисс логарифмическая; максимумы кривых нормированы на единицу

способен ли он поглощать инфракрасное излучение Земли, а если способен, то насколько эффективно. Эффективность, в свою очередь, определяется интенсивностью полос поглощения газа и их расположением относительно максимума излучения Земли. Чтобы сравнить с этой точки зрения перечисленные газы, нужно знать, какова природа полос поглощения молекул в ИК области спектра⁸.

Поглощение энергии инфракрасного излучения молекулами газа происходит в тех случаях, когда под действием излучения возбуждаются либо колебания атомов в молекуле друг относительно друга, либо вращение молекулы как целого. На языке квантовой механики это означает, что происходят переходы на возбужденные колебательные или вращательные уровни энергии молекулы. Расстояния между колебательными уровнями и частоты колебательных переходов намного больше вращательных. Поэтому полосы поглощения (или испускания), соответствующие колебательным переходам, расположены в ближней и средней инфракрасной области спектра (длины волн от ~ 2 до 25 мкм), а полосы или, как обычно говорят, линии вращательных переходов – в дальней ИК области (длины волн от 25 мкм вплоть до микроволнового радиодиапазона).

Наличие вращательных уровней энергии приводит, наряду с возникновением чисто вращательного спектра, также к появлению тонкой структуры колебательных полос. Полосы поглощения, соответствующие молекулярным колебаниям, в газе представляют собой не одиночную полосу, а состоят из большого числа линий, соответствующих комбинированным колебательно-вращательным переходам. Отсюда происходит термин «колебательно-вращательная полоса». Расстояния между линиями вращательного спектра и колебательно-вращательных полос больше для легких молекул, чем для тяжелых.

Необходимым условием поглощения (или испускания) кванта энергии при колебательном переходе является изменение электрического дипольного момента молекулы в процессе соответствующего колебания. Необходимым условием поглощения (или испускания) кванта энергии при вращательном переходе является наличие у молекулы постоянного не равного нулю дипольного момента (ориентация которого меняется при вращении). Из этого следует, что главные компоненты атмосферы – азот и кислород – практически не поглощают инфракрасное излучение. Дипольный момент симметричной двухатомной молекулы N_2 или O_2 равен нулю, и он остается равным нулю при колебании атомов. Это свойство всех симметричных двухатомных молекул, к числу которых относится также входящий в атмосферу в мизерных количествах водород H_2 . Поэтому говорят, что такие молекулы неактивны в инфракрасном поглощении⁹. Соответственно, они не дают вклада в парниковый эффект. Естественно, не поглощают ИК излучение и не дают вклада в парниковый эффект атомарные инертные газы. Активны только молекулы, содержащие три и больше атомов, а также несимметричные двухатомные.

Из числа таких молекул наиболее высокой является концентрация паров воды. Вода – эффективный поглотитель инфракрасного излучения. Все три колебания молекулы воды активны в инфракрасном спектре. В газовой фазе они обуславливают наличие трех интенсивных колебательно-вращательных полос в средней ИК области. Правда, лишь одна из этих полос попадает в область, где интенсивность земного излучения еще значительна – 5–8 мкм; две других – лишь в область «хвоста» (2,5–3 мкм). Однако молекула воды имеет постоянный дипольный момент и, соответственно, чисто вращательный спектр; а поскольку H_2O – легкая молекула, ее вращательный

⁸ Подробное рассмотрение спектроскопического аспекта проблемы парникового эффекта не является задачей данной статьи. В принципе же этот вопрос очень важен, и, к сожалению, не во всех публикациях излагается корректно. Примером публикации, где это сделано достаточно полно и строго, и при этом на уровне, доступном большинству читателей, является статья [1].

⁹ На самом деле это утверждение является точным только для изолированной молекулы. Более строгое рассмотрение показывает, что дипольный момент все же появляется при столкновениях молекул азота или кислорода с другими молекулами. Соответственно, появляются и полосы поглощения, но чрезвычайно слабые. На уровне нашего обсуждения этим эффектом можно пренебречь.

спектр охватывает область от ~ 25 мкм до самых низких частот, где излучение Земли также довольно интенсивно. Эти спектральные свойства воды с учетом высокой концентрации ее паров делают ее главным парниковым газом.

Следующим по величине вклада в парниковый эффект идет углекислый газ. Двуокись углерода – линейная centrosymmetric молекула. Следовательно, у нее нет постоянного дипольного момента и, соответственно, нет чисто вращательного спектра. Поэтому углекислый газ не поглощает в далекой ИК области. Однако, в отличие от двухатомных азота и кислорода, имеющих только одно колебание, молекула CO₂ имеет три колебания, два из которых сопровождаются отклонением от симметрии и появлением дипольного момента. Этим колебаниям соответствуют две колебательно-вращательные полосы в средней ИК области (вблизи 4 и 15 мкм), причем одна из них – сравнительно слабая полоса в районе 15 мкм – точно попадает на максимум излучения Земли.

Вышеперечисленные полосы воды и углекислого газа в настоящее время практически полностью определяют поглощение земной атмосферы в средней и дальней ИК области – от 2,5 до 1000 мкм (или, в единицах см⁻¹, принятых в молекулярной спектроскопии, от 4000 до 10 см⁻¹). Это иллюстрируют рис. 2 и 3. На рис. 2 показано, какой вид имеет спектр поглощения атмосферного воздуха в слое порядка 10 см¹⁰.

Спектр в таком тонком слое, разумеется, не дает адекватного представления о величине реального поглощения многокилометрового слоя земной атмосферы. Зато рисунок, во-первых, дает наглядное представление о вкладах разных газов в это поглощение: хорошо видны колебательно-вращательные полосы паров воды и двуокиси углерода и не видно никаких полос иных газов, относящихся к категории парниковых. Их поглощение настолько слабее, что увидеть его в таком слое без специальных ухищрений невоз-

можно. Во-вторых, из рисунка видно, что Ангстрем был неправ, утверждая, что полосы паров воды и CO₂ поглощают в одной и той же области.

На рисунке можно видеть также, что полосы воды состоят из многих узких линий, в то время как полоса CO₂ в районе 2350 см⁻¹ выглядит как дублет из двух более широких компонент. Но это впечатление обманчивое. Просто расстояние между колебательно-вращательными линиями CO₂ меньше, чем у H₂O. Спектр, снятый с более высоким разрешением – 0,25 см⁻¹ – в правом верхнем углу рисунка показывает, что на самом деле и в этом случае полоса состоит из отдельных узких линий. Между линиями имеются промежутки – так называемые «микро-окна прозрачности». С увеличением толщины слоя газа растет и пиковая интенсивность самих линий, и поглощение в промежутках, где перекрываются крылья линий. Соответственно уменьшается пропускание газа.

В слое порядка толщины земной атмосферы, показанном на рис. 3, многие линии колебательно-вращательных полос практически сливаются в целые области, где пропускание близко к нулю¹¹. Вместе с тем, рис. 3 показывает, что имеются и области, где сохраняется существенное пропускание – «окна прозрачности». Особенно важное значение имеет окно прозрачности в области от ~ 8 до 14 мкм (1250–700⁻¹). В настоящее время «через это окно» уходит в космос значительная часть теплового излучения Земли, причем это часть, непосредственно излученная Землей, а не переизлученная атмосферой. Разумеется, пропускание в области окна не является стопроцентным.

Во-первых, уровень поглощения внутри окна определяется дальними крыльями граничащих с окном полос воды и углекислого газа.

Во-вторых, в окно попадают колебательно-вращательные полосы некоторых других парниковых газов. Это, в частности, метан, озон и фторхлор-

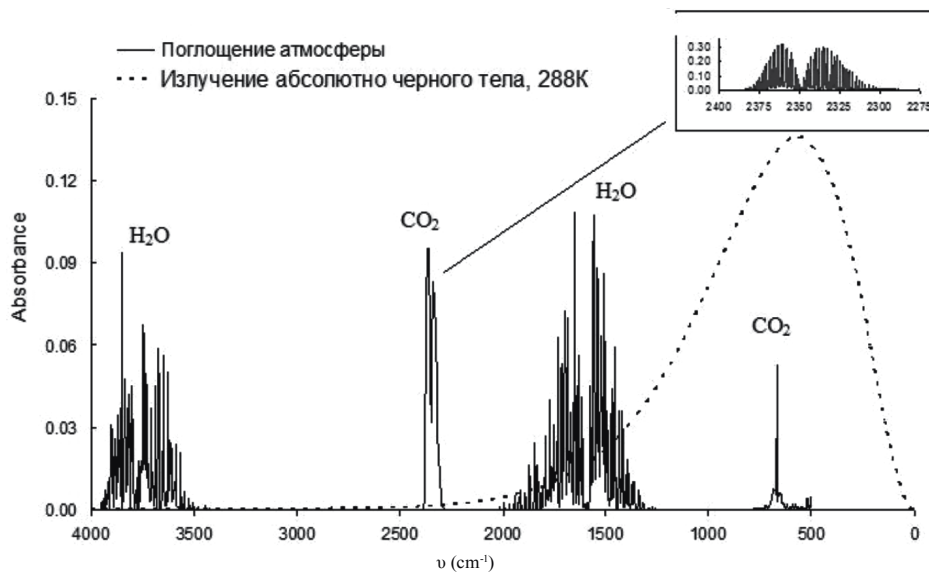


Рис. 2. Спектр поглощения воздуха (разрешение 4 см⁻¹) и спектр излучения абсолютно черного тела при температуре 288 К

¹⁰ Спектр получен автором на типовом фурье-спектрометре Nicolet 6700 FTIR. Область работы прибора со стороны низких частот ограничена 400 см⁻¹ (λ = 25 мкм). Поэтому вращательные полосы воды, расположенные ниже 400 см⁻¹, на рисунке отсутствуют.

¹¹ Спектр получен путем моделирования пропускания атмосферы над обсерваторией Мауна Кеа на Гавайях с помощью базы данных ATRAN (Lord S.D., 1992, NASA Technical Memor. 103957) и приведен на открытом интернет-сайте GEMINI OBSERVATORY. Автор благодарен GEMINI OBSERVATORY, сделавшей доступными эти данные.

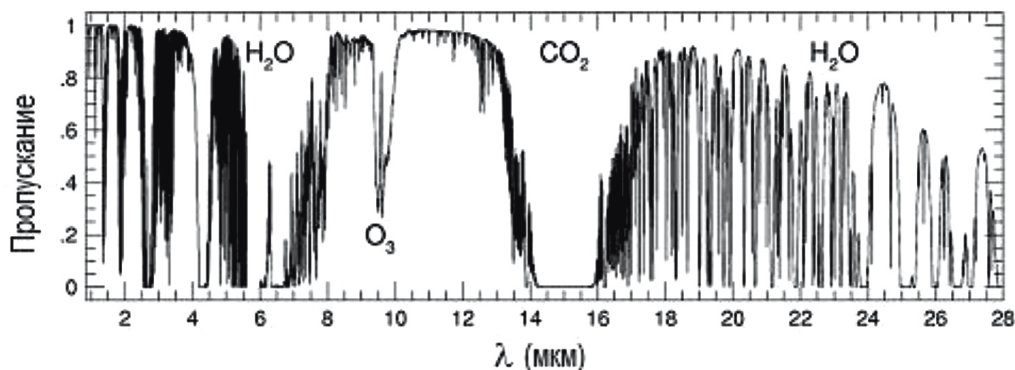


Рис. 3. Спектр пропускания атмосферы

углероды¹². Более подробно о спектральных и иных характеристиках этих газов можно прочесть, например, в [1]. Здесь мы лишь подчеркнем, что их вклад в нынешнее поглощение атмосферы и нынешний, уже существующий парниковый эффект незначителен по сравнению с водой и углекислым газом. Вместе с тем, поскольку концентрация метана и фреонов в последние десятилетия быстро растет, эти газы сейчас рассматриваются как потенциальные усилители парникового эффекта в будущем. Наконец, в-третьих, как сказано выше, анализ послонного переноса излучения в атмосфере, основанный на решении уравнения Шварцшильда и выполненный в ряде работ (например, в [12]), показал, что полное насыщение поглощения не наступает даже в областях максимумов полос парникового газа. «На пальцах» это объясняют обычно следующим образом.

Допустим, что сравнительно тонкий слой воздуха вблизи поверхности Земли способен полностью поглотить проходящее излучение. Нагретый слой становится источником излучения для следующего слоя и т.д. Однако с высотой давление и концентрация молекул падают, и где-то на достаточно большой высоте находится такой слой, который уже не полностью поглощает излучение низколежащего. Часть потока излучения уходит в космос. Если мощность потока излучения, приходящего от Солнца, равна мощности излучаемой в космос, то система находится в равновесии.

Добавим в атмосферу некоторое количество парникового газа, например углекислого газа. Из-за этой добавки последний слой, откуда излучение покидает атмосферу, окажется теперь на несколько большей высоте. На этой высоте температура ниже, соответственно, мощность излучаемая этим слоем в космос будет меньше, чем до увеличения концентрации газа, то есть температурный баланс окажется нарушенным. Это приведет к тому, что температура всех нижележащих слоев начнет повышаться; и будет повышаться до тех пор, пока баланс не восстановится.

Таким образом, в принципе любое увеличение концентрации любого парникового газа, будь то вода, двуокись углерода или иные газы, имеющие полосы поглощения в области излучения Земли, особенно в области окна прозрачности, но даже и за его пределами, может сказаться на тепловом балансе планеты с атмосферой и привести к повышению ее средней

температуры. Следовательно, Ангстрем опять-таки был неправ, утверждая, что парниковый эффект земной атмосферы уже насыщен.

Поскольку гипотеза Аррениуса и последующие работы связывают возможность потепления в первую очередь с эмиссией углекислого газа, в то время как наибольший вклад в сегодняшний парниковый эффект дают пары воды, неоднократно поднимался вопрос о соотношении вкладов воды и углекислого газа. Иначе говоря, какова роль именно углекислого газа в парниковом эффекте? Она пренебрежимо мала по сравнению с ролью воды или же она, хоть и меньше, но все же сравнима и, во всяком случае, существенна? Полемика по этому вопросу между сторонниками антропогенной версии глобального потепления и их оппонентами не утихает по сей день. Количественные оценки соотношения вкладов воды и CO₂, опубликованные разными авторами, противоречивы и колеблются в широких пределах. Поэтому ограничимся следующими замечаниями.

1) Содержание водяного пара в атмосфере не зависит от человеческой активности. Оно всецело определяется температурой океана (и локальных водоемов) и быстро изменяется с изменением температуры. В то же время, по данным ряда исследователей, содержание углекислого газа в атмосфере в течение двадцатого века постоянно увеличивалось. Прирост за 100 лет составил примерно 30%. По мнению сторонников теории антропогенного усиления парникового эффекта, причиной этого роста являются выбросы промышленности и транспорта и сокращение площади лесов, а также то, что избыток углекислого газа, попавшего в атмосферу по тем или иным причинам, лишь частично поглощается океаном. Среднее время жизни молекул углекислого газа в атмосфере составляет сотни лет. В результате происходит их накопление в атмосфере.

2) Как мы видели, существуют такие области спектра, где поглощение CO₂ превышает поглощение воды.

3) Соотношение концентраций молекул воды и углекислого газа меняется с высотой. На больших высотах, в области низких температур, концентрация паров воды по отношению к углекислому газу падает и роль поглощения углекислого газа возрастает.

В заключение этого раздела следует сказать, что использование термина «парниковый эффект» применительно к атмосфере не должно вводить в

¹² Полоса озона в районе 9,6 мкм (~1050 см⁻¹) видна на рис. 3.

заблуждение. На самом деле полного сходства между вышеописанным явлением и сохранением тепла в обычном парнике со стеклянной крышей нет. Хотя стеклянная крыша, как и атмосфера, прозрачна для видимых лучей и непрозрачна для инфракрасных, в обычном парнике этот фактор играет второстепенную роль. Главным является то, что крыша препятствует конвекции, не дает теплему воздуху подниматься вверх и замещаться холодным. В случае земной атмосферы ничто не препятствует конвекции, и основным источником повышения температуры является поглощение тепловой радиации компонентами атмосферы. Поэтому первые исследователи атмосферного парникового эффекта вообще не включали конвекцию в рассмотрение. В современных моделях ей отводится достаточно важная роль.

Заключение

Условно разделяя на этапы историю исследований парникового эффекта и возможности его антропоген-

ного усиления, автор относит все вышеизложенное к первому этапу. Следующим этапом автор склонен считать период 50–70-х гг. XX столетия. В эти годы появились более совершенные модельные расчеты парникового эффекта, выполненные с помощью компьютеров. Были начаты регулярные измерения концентрации молекул CO_2 в атмосфере и исследования обмена углекислым газом между атмосферой и океаном, систематизировались и подвергались анализу данные об изменениях средней температуры в XIX и XX веках. Главными действующими лицами этого периода были несколько американских исследователей – Гильберт Пласс, Роджер Ревелл, Чарльз Килинг, японский ученый Сюкуро Манабе и российский геофизик академик Михаил Будыко. Автор надеется описать их деятельность и связанные с ней события в последующих публикациях.

Автор признателен проф. М.Д. Голубовскому за интерес к работе и дружескую поддержку.

Литература

1. *Тонков М.В.* Спектроскопия парникового эффекта // Соросовский образовательный журнал. – 2001. – Т. 7, № 10. – С. 52–58.
2. *Ångström K.* Über die Bedeutung des Wasserdampfes und der Kohlensäures bei der Absorption der Erdatmosphäre // *Annalen der Physik.* – 1900. – Vol. 4. – P. 720–732.
3. *Arhenius S.* On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground // *Philosophical Magazine.* – 1896. – Vol. 41. – P. 237–276.
4. *Arhenius S.* *Worlds in the Making: The Evolution of the Universe.* – New York: Harper & Brothers, 1908.
5. *Broecker W.S.* Climatic change; are we on the brink of a pronounced global warming? // *Science.* – 1975. – Vol. 189. – P. 460–463.
6. *Callendar G.S.* The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature // *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.* – 1938. – Vol. 64. – P. 223–240.
7. *Callendar G.S.* Can carbon dioxide influence climate? // *Weather.* – 1949. – № 4 (October). – P. 310–314.
8. *Ekholm, Nils.* On the variations of the climate of the geological and historical past and their causes // *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.* – 1901. – Vol. 27. – P. 1–61.
9. *Fleming J.R.* T.C. Chamberlin, climate change and cosmogony // *Stud. Hist. Phil. Mod. Phys.* – 2000. – Vol. 31, № 3. – P. 293–308.
10. *Fleming J.R.* *The Callendar Effect: The Life and Work of Guy Stewart Callendar.* – American Meteorological Society, 2007.
11. *Fourier J.* Remarques Générales Sur Les Températures Du Globe Terrestre Et Des Espaces Planétaires // *Annales de Chimie et de Physique*, 2nd ser. – 1824. – Vol. 27. – P. 136–167.
12. *Plass G.N.* The carbon dioxide theory of climatic change // *Tellus.* – 1956. – Vol. 8. – P. 140–154.
13. *Tyndall J.* On the Absorption and Radiation of Heat by Gases and Vapors, and on the Physical Connection of Radiation, Absorption and Conduction // *Philosophical Transactions.* – February, 1861.

