

## **Парниковый и антипарниковый эффекты в планетных атмосферах**

**А.С. Гинзбург**

**Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН**

**Заседание семинара ИГКЭ 30.05.2016**

Уважаемые коллеги!

Прежде всего я хочу искренне поблагодарить Сергея Михайловича Семенова и коллектив института, потому что это приглашение для меня было очень стимулирующее. Как я выяснил в процессе подготовки к сегодняшнему мероприятию, я всю жизнь занимался чем-то так или иначе связанным с парниковым и антипарниковыми эффектами в атмосфере. Первая публикация 1969 года, а последняя публикация, которую я обнаружил, так или иначе к этому относящаяся - февраля 2016 года. Такой, я бы сказал, не краткий путь.

Та презентация, которую я буду показывать, конечно, эклектическая. Тут и по-русски, и по-английски, разными цветами, разным шрифтом и разные вещи. Но тут собрано то, что я так или иначе хотел попытаться донести до аудитории.

Мы живём, во всяком случае, большинство человечества так думает, в эпоху глобального потепления. И в это время, конечно, внимание привлечено к этой опасности, хотя есть и другие климатические эффекты сильных атмосферных изменений состава и структуры атмосферы. Есть огромное количество примеров, реальных и гипотетических, которые показывают, что может быть не навсегда и не на столетия, но на годы и, быть может, десятилетия, могут быть эффекты не только потепления за счет изменения состава атмосферы, но и похолодания.

Почти всё, что в атмосферу поступает в форме газов ведёт к усилению парникового эффекта. Большинство газов устроено так, что они прозрачны в солнечной части спектра и сильно поглощают тепловое излучение. Но, кроме газов, бывают ещё облака и аэрозоли. Мы очень боимся просто парниковых газов, и практически редко вспоминаем в последние годы о том, какие «аэрозольные» катастрофы уже случались.

Готовясь к этому мероприятию, я посмотрел разные свои списки своих работ и выяснил, что первая моя публикация случилась довольно давно. В честь 50-летия советской власти на Венеру прилетел отечественный спускаемый аппарат. Наверное, это было связано с удобным расположением планет в тот момент, потому что перед этим прилетел американский аппарат. И этот американский аппарат он просмотрел атмосферу Венеры так называемым радиозатменным методом. Так была впервые изучена атмосфера верхней части Венеры. Через короткое время туда спустился советский аппарат. Потом конструкторы нам рассказывали, что знания о том, какова атмосфера Венеры, были до этого практически нулевые. Лишь Ломоносов говорил, что видел через солнечные лучи, проходящие через атмосферу Венеры, если я правильно сейчас процитирую, что «атмосфера Венеры не менее знатная, чем обливает-

ся вокруг нашего Земного шара». Вот так красиво написал Ломоносов. И вот это единственное что было известно до полета космического спускаемого аппарата. Аппарат готовили на то, чтобы он выдержал до 10 атмосфер, но техники-инженеры люди запасливые и они сделали трёхкратный запас прочности. Этого, как выяснилось потом, не хватило. Нужно было рассчитывать на 100 атмосфер. Аппарат перестал подавать сигналы где-то на уровне 30 атмосфер.

Моя первая работа, посвященная моделированию радиационного баланса в атмосфере и парниковому эффекту на Венере, была опубликована совместно с Евой Михайловной Фейгельсон в 1969 году. Потом была и другая, более подробная статья на эту тему. Я даже представить себе не мог в 1969 году, что в 1991 в ИКИ РАН буду защищать докторскую о роли атмосферы в формировании климата планет.

А потом, в 1972 г., прилетели аппараты и на Марс. Как шутили тогда, сели на Марсе и ничего не увидели. Была даже такая карикатура в каком-то американском околonaучном журнале: марсиане включают огромный вентилятор, вздымают пыль с поверхности, чтобы эти чертовы земляне ничего не увидели. Естественно, аппарат на Марс запускали во время Великого противостояния, когда Марс ближе всего к Земле, но, тем самым, он и ближе всего к Солнцу. Как потом стало понятно, пыльные бури на Марсе развиваются именно в то время, когда туда приходит больше всего солнечного света, и светлые и тёмные части Марса нагреваются очень по-разному. Вследствие такого контраста температуры и давления, соответственно, и возникает локальная циркуляция, которая поднимает марсианскую пыль в атмосферу. И вот об этом была моя статья в Докладах академии наук. Георгий Сергеевич Голицын, не будучи тогда даже ещё член-корр. АН СССР, обратился за такой рекомендацией к академику Петрову, директору ИКИ АН СССР, с просьбой представить эту статью в Доклады академии наук.

Потом, примерно с 1982 г., начались исследования, связанные с ядерной зимой. И вот, были подготовлены две для меня очень фундаментальные статьи: одна 1985 года в журнале *Tellus* с Георгием Сергеевичем, а одна в замечательном журнале *Ambio*, т. е. «окружение», «окружающая среда», издающимся шведской академией наук.

В 1982 году в журнале *Ambio* были статьи о том, с чего начинается ядерная зима. Но там не было климатологов среди авторов. Авторы писали только про «ядерную ночь», они догадались, что будет темно. Но когда ученые-климатологи во всём мире прочитали этот выпуск *Ambio*, все дружно заявили: «Будет холодно. Раз будет темно, то будет и холодно». Еще раз: в выпуске журнала *Ambio* 1982 г. о том, что будет похолодание, ни слова не было.

Какое-то количество статей, так или иначе связанных с ролью атмосферы в становлении климата планет, было мной опубликовано уже и в этом веке. Так, в своей статье о парниковом эффекте во втором номере за 2015 г. научного журнала «Фундаментальная и прикладная климатология» Сергей Ми-

хайлович Семенов привел ссылку на статью о роли метана в резких потеплениях в геологическом прошлом Земли. Эта ссылка напомнила мне об этом удачном моем научном произведении, совместном с Георгием Сергеевичем Голицыным (Голицын Г. С., Гинзбург А. С. 2007. Оценки возможности «быстрого» метанового потепления 55 млн. лет назад. — Доклады Российской академии наук, т. 413, №6, с. 816–819). Потом наши друзья химики из НИФХИ им. Л.Я. Карпова уговорили меня с ними вместе написать статью. Эта статья почему-то пользуется очень большой популярностью. Наверное, потому, что она очень доступно написана и опубликована в правильном месте – в Российском химическом журнале.

Совершенно недавно, в январе 2015 года, Георгию Сергеевичу Голицыну исполнилось 80 лет, и научный журнал «Метеорология и гидрология» решил сделать выпуск в его честь (через год с лишним только выпуск состоялся - в феврале 2016 г.). И профессор Военного университета Владимир Петрович Бусыгин обратился ко мне с тем, что он хочет написать в этот выпуск статью в честь Георгия Сергеевича, но о подземных ядерных взрывах. Какое это имеет отношение к Голицыну? В самом деле, вроде бы никакого. Но я вспомнил (сам Георгий Сергеевич не очень хорошо это помнил), что американцы лет тридцать назад, когда мы обсуждали все вопросы, связанные с ядерной зимой, говорили, что эти климатические эффекты должны изменить парадигму ядерного оружия. Вместо огромных боеголовок должны быть маленькие, очень точно наводящиеся. А идеально, чтобы они ещё закапывались в землю. По-английски эти заряды иногда называются «penetrator», т. е. «проникающие». Если они как бы закапываются в землю, то они не вызвали бы пожаров и тогда не было бы климатических последствий ядерной войны. А разрушения были бы – не дай Бог! И вот таким образом удалось перекинуть мостик между ядерной зимой и подземными ядерными взрывами. И вот такая статья вышла в упомянутом юбилейном выпуске.

Ну, это (см. слайд 7) - всем хорошо известная картинка. То, что изображено в правой части, приведено в упомянутой выше статье Сергея Михайловича. А вот левая часть – она из статьи тех же авторов, но только опубликованной, примерно, за десять лет до того. В 2008 году правая картинка появилась, а опубликована была в 2009 году. Самое интересное новшество, приведенное на правой картинке по сравнению с левой - накапливаемая энергия. Не сходится баланс, надо чтобы что-то обязательно поглощалось землей. Думаю, что концу этого десятилетия будет еще следующая картинка, возможно, тоже немного отличающаяся от картинки 2009 г.

Мне очень нравится вот эта красивая картинка (см. слайд 8). Здесь иллюстрируются аэрозольные эффекты, которые возникают при воздействии на атмосферу и тем самым, на климатическую систему. Эти аэрозольные эффекты - двух главных типов. Если нас интересуют климатические, в том числе температурные аспекты, это прямое влияние. Его оказывают дым лесных пожаров, дымы ядерной зимы или азиатского коричневого облака. Есть, однако, и косвенные влияния, когда аэрозоли изменяют и количество и микрофи-

зические свойства облаков. Следующие слайды 9 и 10 - про всякие извержения.

Теперь я покажу некоторые слайды просто для того, чтобы вам было, если интересно, на досуге почитать. Вот целый набор климатических эффектов аэрозолей (см. слайды 11-18). Этот вот (слайд 13) из старинной замечательной статьи Михаила Ивановича Будыко. Тут обозначено не только массовое, но даже полное вымирание биологических видов. Он предполагал, что при некоторых астероидных воздействиях, такое могло быть. В популярной литературе часто можно найти, что когда нечто прилетает и влетает в Землю, то происходит вымирание видов. Считается, что по этой причине около 60 млн. лет назад вымерли динозавры, по логике Михаила Ивановича Будыко. Тогда была такая ситуация, что, по его оценкам, вымерли все живые существа с массой больше 25 кг. Мелкие обладают большей приспособленностью. Говорят, что, может быть, после ядерной зимы, будет Земля травы и насекомых. Т. е. всё большое не переживет сильных похолоданий.

Надо сказать, что в средние века на Земле были и потепления, и похолодания. Были и «вулканические зимы», когда после крупных извержений вулканов несколько лет были аномально холодными. Был, например, не очень хорошо исследованный, но интересный случай голода в России в начале 17 века, возможно также связанный с похолоданием из-за вулканического извержения.

В журнале *Ambio* в статье 1989 г., о которой я уже говорил, была приведена вот эта картинка (см. слайд 23) о самых крупных лесных пожарах XX века. Они все оказались очень разные и очень по-разному влияли на региональные освещенность и температуру, на всё на свете. Самые массовые пожары, огромные, были вот примерно в этих местах, которые на картинке точками обозначены. Понятно, что это 1915 год, и в исходных российских документах не всё было хорошо описано. Некоторые описания, тем не менее, были совершенно замечательные, например, для этой точки. Дело в том, что там была магнитно-метеорологическая обсерватория, именно так она называлась. И ей руководил некий Шостакович. Я спрашивал, пытался с помощью Игоря Леонидовича Кароля найти связь - он, вроде бы, дядя композитора. Так вот он писал, «что нам удалось многие вещи метеорологические в эти годы интересные сделать, потому что, потому что, контингент метеонаблюдателей состоял из очень грамотных людей – политических ссыльных». Он рассылал записки во все метеостанции. Когда вскрылись реки, когда происходило то-то, когда происходило то-то. И в частности, когда был этот пожар, он разослал просьбу посмотреть, какова дальность видимости в этом пожаре.

И вот по его сводке мне удалось по дальности видимости внизу в слое аэрозоля сообразить какова его масса. И, в общем, это не противоречило оценкам по площади, которая сгорела, и выходу дыма. Это удивительно, но такие вещи, простые оценки, можно делать только для очень сильных возмущений. Если это малое возмущение, дымка или что-то, это делать нельзя. Когда это огромный слой дымы, когда видимость там становится сотни мет-

ров, вместо многих километров, то кое-что можно оценить. Это были самые мощные, наверное, пожары.

Были очень мощные пожары и в канадской провинции Альберта в пятидесятом году. Там был огромный сухой лес, столб дыма поднялся вверх и дошёл практически до стратосферы. Говорят, даже немножко его было видно по другую сторону Атлантики. Над Великими озёрами была голубая луна. Настолько был сильный слой дыма.

Многие из вас, наверное, помнят знаменитые пожары 1972 года на Европейской территории СССР. И вот, были такие случаи, когда мы примерно знали, куда движется шлейф дыма, и, естественно, такие, когда не знали. Вот эти все дымы мы с Георгием Сергеевичем Голицыным и другими соратниками обсчитали в зависимости от того, где дым лежит. Если дым внизу лежит у поверхности, то больше солнца поглощается и тогда становится теплее. Потому что это как бы альбедо поверхности становится меньше, больше поглощается – больше нагревается. А если дым наверху, то поглощается солнечное излучение наверху и, соответственно, не проходит вниз. Эффект потепления как бы отменяется. Я приведу еще такой пример для иллюстрации, только сейчас вспомнил, не вспоминал много лет. Если вы грелку положите под одеяло, будет теплее, а если на одеяло – то, в общем, всё равно, если одеяло достаточно мощное. То есть важно не только, чего и сколько выбросили в атмосферу, но и на какой высоте.

Наши работы по ядерной зиме были выполнены в восьмидесятые годы. Первые расчеты делали в Вычислительном центре у Никиты Николаевича Моисеева. Но хочу напомнить, что ядерной зимой продолжают заниматься до сих пор. Была опубликована статья в 2007 году с нашим коллегой Георгием Стенчиковым, который в свое время работал с Владимиром Александровым.

Вот, тут мы с Сергеем Михайловичем вспоминали, что с нас потребовали для отчетности публикации, в том числе популярные, в том числе упоминания в СМИ, 2013 года. Напомню, что в 2013 году было одно из обострений ядерных амбиций Северной Кореи, а до этого я как-то делал оценки для Индии и Пакистана. Ну так вот, все ядерные запасы, которые есть в Северной Корее, Индии и Пакистане, никак на климат воздействовать не могут. На самом деле ядерная зима – это эффект как бы третьего порядка. Ни самая энергия ядерного взрыва никакого не дает глобального температурного климатического эффекта, никакая даже энергия пожара ядерной войны не даёт никакого глобального климатического эффекта. И только дым, который поднимется и создает существенный однородный слой, только он регулирует солнечное излучение, достигающее земной поверхности, и приводит к похолоданию. Поэтому, ядерная зима – это некий уникальный случай, когда, хотя бы гипотетически, удалось посмотреть на эффект практически третьего порядка.

Теперь еще немного о других планетах. Усреднённые температуры в приповерхностном слое атмосфер планет земной группы, кроме Меркурия,

обусловлены парниковым эффектом. И они разнообразны. На Меркурии атмосферы практически нет. Там также как на Луне: какой стороной перевернулся, сколько Солнца упало, на столько поверхность и нагрелась. На сколько за ночь успела остыть, на столько и остыла. А на Земле у нас такая замечательная атмосфера, которая обладает тем свойством, что её оптическая толщина в тепловом диапазоне порядка единицы, единица – двойка. Точность здесь не важна, а важно то, что атмосфера практически целиком прогревается и потом излучает одинаково, примерно одинаково, и вверх - в космос, и вниз - к поверхности.

Однако на Венере, где давление около 100 атмосфер, всё несколько по другому. Вот главные формулы (см. слайд 27). Средняя эффективная температура поверхности планеты определяются вот таким образом (формула на слайде 27). Почему здесь стоит коэффициент  $\frac{1}{4}$  или 0,25? Потому, что поверхность шара ровно в четыре раза больше площади круга - его большого сечения. Тот поток солнечного излучения, который приходится на этот круг, «размазывается» на всю поверхность шара из-за вращения. Поэтому 0,25.

Вот эти две абсолютно мной любимые формулы (см. слайд 27), которые, ну, может быть, не в 1969, а в 1970-71 годах, предложила мне Ева Михайловна Фейгельсон. Она при этом шутливо сказала: «Саша, я Вам написала, как минимум, кандидатскую». Вот, эти формулы, которые оказались для меня абсолютно историческими. Оказывается, такими простыми формулами можно описать очень большое количество явлений как земной атмосферы, так и марсианской. А для Венеры из этого ничего не получится, потому что Венера таких слоёв имеет огромное количество. Однослойная модель здесь не подходит, нужны многослойные модели. Этим занимались и Сергей Михайлович Семенов и Самвел Самвелович Григорян. С.С. Григорян подошел к проблеме как механик. Он представлял себе атмосферу как стопку стеклянных пластинок, обладающих свойством отражать излучение и его поглощать.

Теперь немного и составе планетных атмосфер. На Венере и на Марсе практически сплошной углекислый газ, а у нас его немного. Интересно, что водяного пара в процентах везде примерно одинаковое количество. Ну, и кислорода много только на Земле. На всякий случай, я в таблицу о составе атмосфер взял только наиболее известное и интересное.

А вот, основные параметры планетных атмосфер. Тут ещё и Меркурий добавлен. Для чего? Чтобы показать, что у него на солнышке 750 К, а самой холодной точке 100 К. На Венере при, примерно, 90 атм. давления, оказалась сумасшедшая температура. А Марс – он немножечко Земля и немножечко Меркурий. На Земле имеет смысл средняя температура, на Меркурии не имеет никакого смысла, а на Марсе имеет относительный смысл.

На Венере. Она целиком покрыта облачностью, достаточно высоко. Вот я вернусь ещё немножко назад и покажу вам интересную вещь. На Венере достаточно заметное количество серы, и это оказалось очень важным моментом. Фактически облака на Венере состоят из очень мелких капель, значительно мельче, чем на Земле. И у них совсем другой ход поглощения и от-

ражения. Эти капельки состоят из сернистой и серной кислот. И они имеют другой спектр рассеяния и поглощения, по сравнению с водяными каплями.

В отношении облачности, на Земле мы как раз посередке - облаков больше, чем на Марсе и меньше, чем на Венере. На Венере облака в стратосфере, в каком-то смысле в стратосфере, на Марсе они появляются и исчезают как спорадически, то на Земле, что очень фундаментально, – облака в толще тропосферы. И поскольку тропосфера перемешана, то баллу облачности особенно далеко от пяти баллов деваться некуда. Потому что восходящих и нисходящих потоков должно быть примерно одинаковое количество. Там, где восходящие потоки – нет облаков, где нисходящие – есть облака.

И вот уже совсем для развлечения – см. слайд 32. Вот видите тут еле различимое, мгновенное в геологическом понимании событие: в течение примерно 70 тысяч лет вдруг потеплело примерно на 5 – 9 градусов. Это нам соседи геологи рассказали из Геологического института РАН. И нам удалось сделать быструю модельную оценку этого явления. Его, оказалось, можно объяснить огромным выходом в атмосферу метана из недр Земли. Вот такую заметку вместе с Георгием Сергеевичем Голицыным мы опубликовали в 2007 г.

Таким образом, вся моя жизнь за последние почти 50 лет так или иначе связана с этой тематикой. Я всё время от неё отходил, но потом возвращался. Два года назад был семинар, посвященный столетию Георгия Владимировича Розенберга, где я сделал маленький доклад по этим вопросам. И тут меня очень вдохновил Сергей Михайлович Семенов попробовать собрать хоть что-нибудь, что я ещё про это помню.

Спасибо за внимание!