

Серебристым облакам уже 130 лет



П.А.Далин, В.А.Ромейко, Н.Н.Перцев, В.И.Перминов

Человеку свойственно отмечать памятные даты и юбилеи. И сейчас, отпраздновав 50-летие Института космических исследований РАН, мы хотим еще раз поговорить о необычном атмосферном явлении, которое тоже встречает очередной «круглый» день рождения. Речь идет о серебристых облаках. Данный феномен, внезапно засиявший на ночном небе 130 лет назад, не был мимолетным, не исчез с небесного свода так же внезапно, как это присуще кометам, а продолжает приковывать внимание наблюдателей ночного неба и исследователей атмосферы каждый летний сезон и теперь. Каковы же современные научные достижения в изучении интересного атмосферного процесса?

Начало эпохи

Об истории открытия облаков необычного вида мы уже рассказывали читателям журнала*, здесь вспомним лишь двоих исследователей — нашего соотечественника и автора названия. Русский астроном, приват-доцент, а позже профессор Московского университета Витольд Карлович Цераский регулярно проводил фотометрические измерения блеска звезд в период с 1875 по 1916 г. Под утро 30 мая 1885 г. (12 июня по новому стилю) он возвращался в Московскую обсерваторию после загородной прогулки, и его внимание неожиданно привлекли удивительно яркие светящиеся облака, переливающиеся на фоне сумеречного сегмента [1]. Важно отметить, что странные облака были замечены одновременно и повсеместно в Европе и России в июне и июле 1885 г. Среди западных первооткрывателей и исследователей ночных облаков стоит выделить немецкого астронома Отто Йессе, посвятившего часть своей жизни изучению именно ночных облаков и пред-

ложившего поэтичное название «серебристые облака», которое в России закрепилось как научный термин. Эквивалентный международный термин — noctilucens clouds, NLC (ночные светящиеся облака).

Часто можно услышать такой вопрос: «Почему серебристые облака не были замечены до 1885 г.?». Исследуя исторический аспект изучения серебристых облаков (СО) [2], мы убедились, что первые надежные наблюдения СО были выполнены действительно в июне 1885 г. И Цераский, и Йессе специально отмечали, что не могли бы пропустить такие облака, появившись они в прежние годы [2, 3]. Вообще-то в литературе сохранились более ранние описания ночных облаков, но среди них нет ни одного свидетельства, которое бы однозначно приводило признаки, присущие серебристым облакам. Поэтому такие сообщения всегда будут оставаться неопределенными.

Предполагается, что причина грандиозных появлений СО летом 1885 г. заключается в двух вулканических извержениях, произошедших практически одновременно в 1883 г. Первое, длительное, закончилось катастрофой — вулкан Кракатау в Индонезийском архипелаге в конце августа взорвался, выбросив в атмосферу огромное количество водяного пара (100–200 Мт) и вулканической пыли (20 км³). Второе мощное извержение состоялось 6 октября: проснулся вулкан Августин на юге Аляски, который также внес свой вклад в атмосферу в виде выброшенного водяного пара и аэрозольных частиц. Благодаря глобальному переносу воздушных масс и вертикальной диффузии водяной пар и вулканическая пыль через полтора года поднялись высоко в атмосферу до высот 80–90 км в субполярных и полярных широтах, где под воздействием низких температур послужили «строительным материалом» для образования колоссального числа ледяных частиц. Именно последние и образовали необычно яркие и протяженные поля серебристых облаков, зарегистрированные многочисленными наблюдателями в Европе и России летом 1885 г.

* Далин П.А., Перцев Н.Н., Ромейко В.А. Серебристым облакам 120 лет? // Природа. 2005. №6. С.12–21.

© Далин П.А., Ромейко В.А., Перцев Н.Н., Перминов В.И., 2015

Необходимо отметить тот факт, что после 1885 г. ночные светящиеся облака появлялись практически каждый год уже без заметной корреляции с вулканическими извержениями XX—XXI в. Вероятной причиной этого эффекта стало постепенное увлажнение области высот 80—90 км, связанное с ростом концентрации метана, — предположительно из-за усиления антропогенной (индустриальной) активности в конце XIX — начале XX в. [4]. Об этом еще пойдет речь впереди.

Где и когда наблюдаются?

Серебристые облака — самые высокие облака в земной атмосфере. Они образуются в области очень холодного атмосферного слоя — мезопазузы на высотах 80—90 км в летнее время, когда температура мезопазузы понижается до своих минимальных значений, лежащих в пределах от -140° до -120°C . Это самые низкие температуры в земной атмосфере. СО наблюдаются в ночное время с середины мая по середину августа в Северном полушарии и с середины ноября по середину февраля — в Южном. Наиболее благоприятные условия для их наблюдений складываются на широтах 55° — 60° , хотя диапазон широт, на которых могут появляться ночные облака, достаточно широк и составляет 45° — 90° . Из-за того, что СО образуются высоко над земной поверхностью, ледяные частицы радиусом 30—100 нм рассеивают свет уже зашедшего за горизонт светила, и серебристые облака остаются видимыми в течение всей ночи или значительной ее части, тогда как все другие типы облаков в ночное время имеют темно-серый цвет (или совсем невидны), поскольку не освещаются Солнцем. Пример ночных светящихся облаков показан на рис.1. Более подробную информацию об условиях их наблюдений можно найти в работе [5].



Петр Александрович Далин, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник ИКИ РАН, в настоящее время работает в Шведском институте космической физики (г.Кируна). Занимается исследованием полярной мезосферы и волновых процессов в средней атмосфере. Участник многочисленных экспедиций по наблюдению серебристых облаков, один из авторов создания сети их автоматической фотосъемки.



Виталий Александрович Ромейко, заведующий Звенигородской астрономической обсерваторией отдела астрономии и космонавтики Московского городского дворца творчества на Воробьевых горах. Астроном и педагог, более 45 лет организует и проводит регулярные наблюдения серебристых облаков. Один из ведущих отечественных специалистов в этой области.



Николай Николаевич Перцев, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики верхней атмосферы Института физики атмосферы им.А.М.Обухова РАН. Специалист по анализу данных дистанционных измерений характеристик области мезопазузы, участник экспедиционных кампаний по наблюдению серебристых облаков и программы их автоматической фотосъемки.



Владимир Иванович Перминов, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник той же лаборатории. Область научных интересов — динамика и энергетика верхних слоев атмосферы.

Как образуются?

Для формирования и существования ледяных частиц на высотах 80—90 км, где атмосферное давление на пять-шесть порядков меньше приземного, требуется выполнение трех условий. Во-первых, нужна очень низкая температура (те самые от -140° до -120°C). Во-вторых, необходимо достаточное количество водяного пара, в среднем четыре-пять молекул H_2O на 1 млн молекул окружающего



Рис.1. Пример ярких серебристых облаков над Москвой в ночь 7–8 июля 2014 г.
Фото В.А.Ромейко

воздуха (4–5 ppmv). В-третьих, для роста ледяных кристаллов должны присутствовать ядра конденсации, которыми служат метеорная пыль, гидратированные ионные кластеры (скопления ионов с присоединенными молекулами воды) и пыль земного происхождения, включая вулканический аэрозоль.

Общая схема образования ледяных частиц состоит в следующем. На ядрах конденсации начинают намерзать молекулы водяного пара, когда первые оказываются в высотном интервале 82–87 км (т.е. в зоне, где температуры уже опускаются ниже точки замерзания льда). К ледяным частицам присоединяется все больше и больше молекул воды, кристаллы растут в размере и оседают вниз под действием силы тяжести. Когда размер ледяных частиц превысит 30 нм, они становятся способными рассеивать достаточное количество солнечного света, чтобы быть видимыми как облака с поверхности земли в ночное время. Более подробно с физикой образования серебристых облаков можно ознакомиться в уже упоминавшейся статье в «Природе» и в работах [5–7].

Необходимо отметить важную (а возможно, и решающую) роль метана (CH_4) в общем глобальном балансе водяного пара в средней атмосфере. Метан — парниковый газ, поступающий в атмосферу с земной поверхности, в том числе из-за жизнедеятельности человека, связанной с сельским хозяйством и промышленными выбросами. Молекулы метана легче молекул окружающего воздуха, поэтому они медленно диффундируют, поднимаясь вверх. Выше 30 км метан фотодиссоциирует и окисляется с образованием воды. В среднем одна молекула метана производит в мезосфере две молекулы воды [4]. Отсюда следует, что метан служит там мощным дополнительным

источником влажности. Если происходит существенное увеличение концентрации метана из-за антропогенной активности, это должно значительно повысить уровень влажности в мезопаузе. В свою очередь, должна возрасти активность серебристых облаков, так как размер ледяных частиц зависит от числа свободных молекул H_2O . Но как мы покажем ниже, активность ночных облаков практически не изменяется на протяжении последних пяти десятилетий.

Космические будни

Строго говоря, определение «ночные облака» применять в нашей космической эре не совсем корректно, поскольку

серебристые облака существуют и в дневное время и их можно наблюдать со спутников и орбитальных станций «с изнанки», сверху. Наблюдаемые из космоса облака в литературе принято называть полярными мезосферными (ПМО или, по-английски, РМС). Впервые их удалось заметить космонавту А.А.Леонову 18–19 марта 1965 г. с борта космического корабля «Восход-2». Первые же целенаправленные наблюдения ПМО были выполнены в мае и июле 1973 г. исследователем П.Вейцем с борта американской орбитальной станции «Skylab».

С 1978 г. регулярные исследования ПМО ведутся в основном американскими геофизическими спутниками НАСА. До недавнего времени наблюдения с них проводились в так называемой лимбовой геометрии (прибор сканировал участок атмосферы вблизи касательной к земному шару, при этом ПМО регистрировались как светлые точки). Для такого сканирования используются ультрафиолетовые (252–292 нм) фотометры, которые измеряют интенсивность солнечного света, рассеянного частицами ПМО под разными углами. При этом спутник, в отличие от земного наблюдателя, не ограничен погодными условиями и временем суток и может регистрировать ПМО круглосуточно.

Космонавты и астронавты часто наблюдают серебристые облака через иллюминаторы орбитальных станций. Значительное внимание серебристым облакам уделяли отечественные космонавты В.В.Коваленок, Г.М.Гречко, А.С.Иванченков, В.П.Савиных, В.Г.Титов, А.Ю.Калери, О.В.Котов, Ф.Н.Юрчихин. В течение 10–15 мин им удавалось увидеть яркие протяженные поля СО на фоне атмосферного лимба, тогда как наблюдателям с Земли для этого требовалась целая ночь. Замеча-

тельный фотоархив снимков светящихся облаков, сделанных Юрчихиным с борта Международной космической станции (МКС), можно посмотреть на его веб-сайте*. Один из таких снимков представлен на рис.2. Недавно, в марте 2014 г., на внешней стороне МКС были установлены четыре обзорные видеокамеры, которые работают автоматически в реальном времени и при удачном стечении обстоятельств могут зарегистрировать СО, появившиеся на средних широтах**.

25 апреля 2007 г. с целью изучения СО был успешно запущен американский космический аппарат AIM (Aeronomy of Ice in the Mesosphere — Микрофизика льда в мезосфере), продолжающий работать и в настоящее время***. Огромное преимущество данного проекта — возможность регистрации СО при вертикальной геометрии, т.е. наблюдение светящихся облаков в надире на фоне поверхности Земли. Фотокамеры одного из его научных приборов CIPS (Cloud Imaging and Particle Size — пространственное регистрирование облаков и оценка размера частиц) направлены на земную поверхность и делают фотосъемку в жесткой ультрафиолетовой (УФ) части спектра на длине волны 265 нм. Вообще-то из-за полного поглощения жестких УФ-лучей озоновым слоем на высоте 20–40 км земная поверхность невидима для космических фотокамер на данной длине волны. Но если образуются серебристые облака (располагающиеся выше озонового слоя), они рассеивают УФ солнечный свет и становятся заметны на черном фоне снимков. Данная методика позволяет определять положение СО относительно земли с точностью до 1 км, а также определять «тонкую» структуру облаков, т.е. изучать мелкомасштабные волновые процессы с длиной волны до 5 км. Космические снимки показывают, что СО непрерывно существуют в летний период и наблюдаются круглосуточно в полярных регионах обоих полушарий выше широт 70°. Можно сказать, что над полярными регионами нашей планеты (но только в летнее время) образуется ледяной «континент» в атмосфере на высотах 80–85 км, иллюстрацией чему служит композиционный снимок на рис.3. От «континента» часто откалываются «айсберги», которые постепенно перемещаются в субполяр-

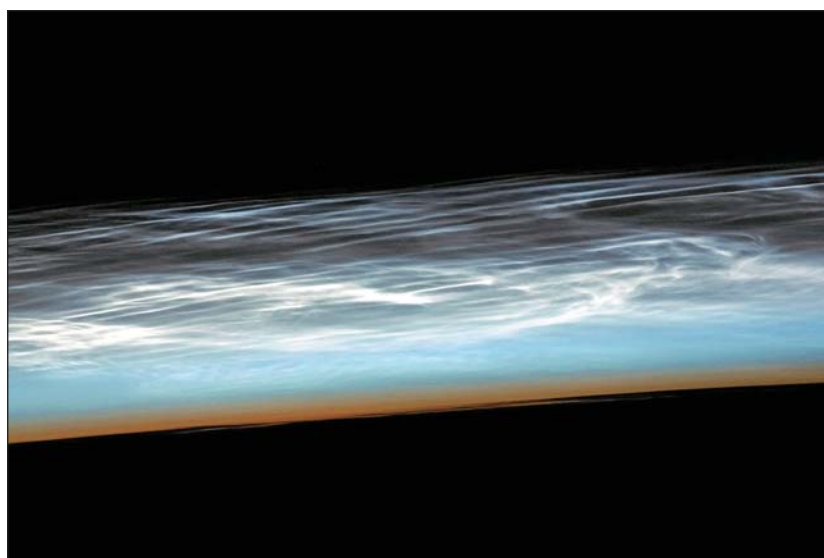


Рис.2. Серебристые облака с борта МКС. Длинные полосы СО отчетливо видны на атмосферном лимбе. Похожие полосы наблюдаются и с поверхности Земли.

Фото космонавта Ф.Н.Юрчихина

ные и средние широты благодаря ветру, имеющему летом компоненту в направлении с севера на юг, и эти айсберги становятся видимыми наблюдателю с поверхности земли в ночное время как поля серебристых облаков.

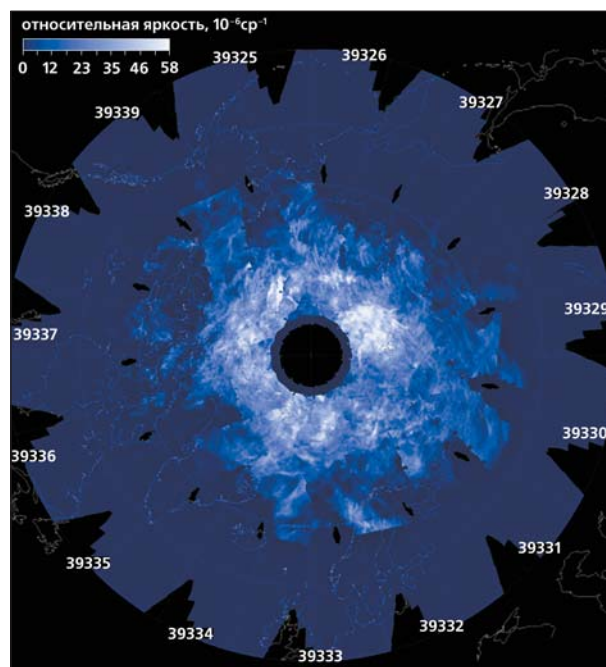


Рис.3. Полярные мезосферные облака над Северным полюсом 11 июля 2014 г. Снимок сделан в надир цифровыми камерами CIPS на длине волны 265 нм с борта аппарата AIM. Данный снимок — композиционный, т.е. состоит из 15 склеенных друг с другом индивидуальных снимков, полученных в течение суток.

* <http://yurchikhin.livejournal.com/2782.html#cutid1>

** http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/917.html#images

*** <http://science.nasa.gov/missions/aim/>

Взгляд с Земли

Несмотря на огромные преимущества аппарата АИМ, цифровые камеры прибора CIPS не могут регистрировать ПМО/СО, образующиеся на субполярных и средних широтах ниже 62° . Поэтому наблюдения из космоса не могут предоставить полноценную картину о пути «жизни» облаков от момента их образования до сублимации. Следовательно, наземные наблюдения не теряют своей актуальности, но значительно дополняют исследования СО из космоса. Не нужно забывать и о том, что временное и пространственное разрешение наземных наблюдений на порядок превышает аналогичные показатели, получаемые из космоса.

С 2004 г. в Северном полушарии начала функционировать сеть цифровых автоматических фотокамер для регистрации СО и изучения их пространственно-временной динамики. Данная сеть получила название САФСО — Сеть автоматической фотосъемки серебристых облаков. Идея и техническая реализация САФСО была разработана авторами данной статьи при поддержке любителей-энтузиастов наблюдений СО в нескольких странах мира: России, Швеции, Литве, Дании, Великобритании и Канаде. Летом 2015 г. сеть включала в себя семь стационарных наблюдательных пунктов, расположенных в Москве, Новосибирске, Петропавловске-Камчатском, Атабаске (Канада), Глазго (Шотландия), Силкебурге (Дания) и Вильнюсе (Литва), рис.4. В Московской обл. и Литве работают по три синхронных камеры, а в Дании и Канаде — по две. Достоинство данной сети — расположение фотокамер вдоль одного широтного круга ($53\text{--}56^\circ$ с.ш.), что позволяет проводить сравни-

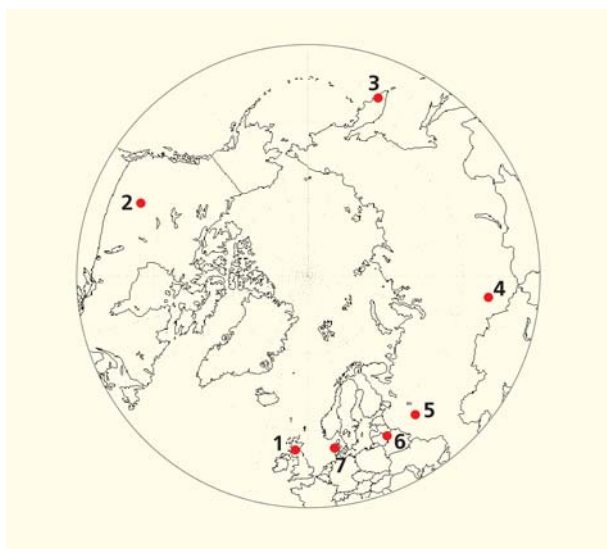


Рис.4. Расположение станций САФСО в 2015 г.: 1 — Глазго (Шотландия), 2 — Атабаска (Канада), 3 — Петропавловск-Камчатский, 4 — Новосибирск, 5 — Москва, 6 — Вильнюс (Литва), 7 — Силкебург (Дания).

мые наблюдения СО, когда создаются условия одинаковой освещенности сумеречного сегмента Солнцем и близкие физические условия в мезопаузе (температура и скорость ветра в ней зависят от географической широты). Наличие двух и трех камер (разнесенных на расстояние 20—100 км) в одном пункте дает возможность выполнять триангуляционные измерения с целью определения высот СО, а значит, исследовать динамические волновые процессы в трехмерном пространстве в области мезопаузы. САФСО работает по единой программе наблюдений с 20 мая по 15 августа каждого года с использованием режима покадровой съемки (time lapse) через односторонний интервал. Первые научные результаты на основе измерений САФСО опубликованы в работе [8].

Стоит отметить следующие научные достижения, полученные на основе измерений САФСО. По ее данным можно проследить распространение атмосферных планетарных волн, из которых наиболее значимы волны с периодами в два и пять дней. Распространяясь через слой, где могут возникать серебристые облака, они изменяют соответствующим образом частоту появления и яркость СО. Так, в 2006 и 2007 гг. двухдневные планетарные волны повлияли на активность СО в большей степени, чем пятидневные волны. Напомним читателю, что яркость серебристых облаков оценивается визуально по пятибалльной шкале, от 0 (отсутствие облаков) до 5 (максимальная яркость).

Детальное сопоставление появлений и яркости СО с температурой в мезопаузе, измеренной спутниковыми методами, показывает, что светящиеся облака действительно очень чувствительны к изменению температуры и существуют при минимальных ее значениях в диапазоне от -138° до -126°C . При температурах выше -126°C облака практически (за редкими исключениями) не наблюдаются.

Определенное внимание в наших исследованиях уделяется изменениям яркости СО. Было замечено, что влияние планетарных волн на изменение яркости СО небольшое, в среднем их вклад составляет 3—5%. Поэтому приходится искать другой механизм, ответственный за оставшуюся значительную часть вариаций яркости светящихся облаков. Вероятный кандидат на эту должность — атмосферные гравитационные волны (АГВ). Действительно, мы всегда наблюдаем АГВ различных масштабов в серебристых облаках — в виде полос, волнообразных изгибов, гребней и гребешков; случаи, когда облака представлены только однородным флером, встречаются редко. При прохождении АГВ через слой СО их яркость изменяется (в одной области пространства яркость уменьшается, в другой — увеличивается), а иногда светящиеся облака могут полностью исчезнуть. С помощью САФСО мы изучили ряд интересных случаев распространения АГВ, среди которых можно выделить так называемый мезосферный фронт (зарегистрированный двумя камерами в Канаде),

при котором четко видна резкая «серебристая» граница протяженностью более 300 км. Она разделяет мезопаузу на холодную область, заполненную серебристыми облаками, и теплую, в которой облака полностью отсутствуют. Мы выяснили, что причина такого феномена заключается в резком температурном перепаде в 20—25°, возникающем на границе фронта. При этом обнаружилось: граница «серебристого» фронта может сильно изменять свою высоту, достигая 96 км, что на 10—12 км превышает обычный уровень высот СО.

Другой уникальный случай в наблюдениях СО наглядно свидетельствует о связи верхних слоев атмосферы с метеорологическими явлениями в тропосфере. Речь идет об изолированной волне (т.е. АГВ), которая образовала в области мезопаузы компактный слой СО размером 65—70 км. Анализ распространения волны через атмосферу и метеорологической ситуации в нижележащих атмосферных слоях позволил определить источник генерации АГВ — им оказался атмосферный фронт в тропосфере на высоте 5 км. При этом волна смогла пройти сквозь всю толщу атмосферы до высот 83—85 км, где и образовала слой серебристых облаков.

От нормы к аномалии

За последние 50 лет благодаря всему массиву наблюдений, составляющему десятки тысяч появлений СО, удалось выявить их устойчивые сезонно-климатические особенности. Но на фоне типичных, более или менее стандартных случаев стали отмечаться и не укладывающиеся в привычные рамки, «аномальные» появления облаков.

Начиная с 60-х годов прошлого столетия поступают сообщения о возникновении серебристых облаков не только в ранние и поздние сроки, но и вне традиционной зоны их видимости. Накопленный статистический материал позволил различить целый ряд характерных видов аномалий.

Сезонные аномалии. К ним относят ранние и поздние появления СО, т.е. до мая и после августа. Например, 15, 16 и 23 сентября 1968 г. в вечернее время ночные светящиеся облака в виде размытого флера и полос возникли над южным Казахстаном в районе оз.Балхаш (46.9° с.ш.). 29 декабря 1978 г. СО были замечены с самолета на маршруте Москва—Алма-Ата. 10—11 апреля 1982 г. вблизи Ленинграда на горизонте были видны яркие (до пяти баллов) серебристые облака вместе с полярным сиянием. 28 декабря 1973 г. СО в виде ярких гребешков, гребней и волн наблюдали с самолета в районе Балтийского моря. А 12 февраля 1976 г. СО были замечены в районе Томска.

Широтные аномалии. Эти аномалии определяют видимость СО вне их «традиционной» зоны появления, чаще всего в южных районах Северного полушария. Так, 9 декабря 1972 г. с борта самолета наблюдались наклонные светящиеся полосы се-

ребристых облаков над Сирией и Ираком. До этого самая южная точка наблюдений находилась на 44.5° с.ш. в Крыму, в районе г.Бахчисарая, и на юге Франции в г.Барде (44° с.ш.). Тогда, в ночь с 1 на 2 июля 1908 г., их появление связывали с крупнейшей космической катастрофой — Тунгусским взрывом. 2 июля 2011 г. СО были сфотографированы с самолета над Денвером (штат Колорадо, 38° с.ш.), а 13 октября 2012 г. — над Ираном (в районе горы Салабан, 38° с.ш.). Космонавт-исследователь Савиных также отмечал во время полетов появление СО вне зоны их традиционной видимости.

Временные аномалии. В данном случае имеется в виду продолжительность видимости СО в каком-либо регионе. Отмечено, что средняя непрерывная длительность их видимости для одного пункта составляет 3.7 ночи. Вместе с тем бывали эпизоды, когда она составляла более 10 ночей. Например, в Московской обл. в 1977 г. СО наблюдались в течение 12 ночей, в 1981 г. — 13 ночей, в 1987 г. — 22 ночи подряд. В северных районах (в районе Тунгусской катастрофы, 60° с.ш.) ночные светящиеся облака наблюдались без перерыва 13 ночей в 1995 г.

Искусственные СО. Как показали расчеты и наблюдения, источником, который может обеспечить образование высотных облаков в наш космический век, стали жидкостные ракеты вторых ступеней мощных ракетносителей, отрабатывающих на высотах 50—160 км. При каждом запуске ракетносителя типа «Союз» выбрасывает около 11 т водяного пара, а американский носитель «Шаттл» — до 350 т на высотах 100—115 км. В связи с увеличением ракетных выбросов естественно ожидать увеличения интенсивности облакообразования в мезосфере за последние три-четыре десятилетия [9], однако окончательной ясности в этом вопросе нет. Стоит отметить запуск ракеты-носителя «Союз-2.1а» из Плесецка 22 мая 2009 г., при котором феерические искусственные серебристые облака были одновременно сфотографированы из Петрозаводска (наблюдателем А.Мезенцевым), из Вологды (наблюдателем А.Смирновым) и из Москвы (автоматической камерой САФСО). Формирование и динамика этих искусственных СО подробно рассмотрены в работе [10].

Тунгусская аномалия. Последствия вторжения в атмосферу Тунгусского космического тела были столь масштабными, что заслуживают отдельного пункта. Наблюдение СО над Западной Европой и Россией после Тунгусской космической катастрофы 30 июня 1908 г. представляло особый интерес. Через 15 ч после взрыва и на протяжении последующих трех дней отмечались мощные оптические аномалии в виде свечения неба и появления ярких СО. В этот период их наблюдали по меньшей мере в 42 пунктах в широтном и долготном интервале 44.8—59.0° с.ш., 2.4° з.д.—46.1° в.д. соответственно. Аномально яркие сумерки видели непрерывно в течение нескольких ночей. Многие наблюдатели

прямо указывали на то, что *«свет исходил из светящейся дымки облаков»*. При этом одной из особенностей данного появления было наличие развитых морфологических структур с волновыми образованиями длиной от 3 до 300 км, характеризующими наиболее активные периоды появления СО. Общая занимаемая ими площадь, по минимальным оценкам, составила 10–12 млн км².

Существует целая серия наблюдений, связывающая образование серебристых облаков с крупными взрывами, вулканическими извержениями. В 1985 г. при работе на орбитальной станции «Салют-7» Савиных удалось зафиксировать уникальный случай образования аэрозольных облаков, имеющих значительное сходство с серебристыми, при мощном извержении вулкана Руис в Колумбии.

Перспективы активности

В настоящее время самым дискуссионным остается вопрос о наличии долговременных трендов в характеристиках СО, и тому есть причины. Дело в том, что эти облака — очень тонкие по структуре атмосферные образования (как отмечалось выше, размер ледяных частиц составляет десятки нанометров, т.е. порядка одной тысячной толщины человеческого волоса). Небольшие вариации температуры или влажности в летней мезопаузе способны существенно изменить активность формирования и существования СО. Следовательно, ночные светящиеся облака могут служить прекрасным естественным индикатором возможных климатических изменений, происходящих в земной атмосфере. Данная тема сегодня очень актуальна как в научных, так и в политических сообществах, она широко обсуждается в интернете, в печати и докладах об изменениях климата на уровне глав государств. Единого мнения по вопросу, происходят ли действительно эти изменения, нет, и сомнения сохраняются, как мы покажем ниже на примере активности СО за последние десятилетия. Кроме того, так исторически сложилось, что существуют два различных атмосферных сообщества («наземное» и «космическое»), которые отстаивают две противоположные точки зрения о наличии трендов в активности СО. «Наземное» научное сообщество (к которому относится наша группа) опирается на долговре-

менные измерения активности СО, выполненные в Московской обл. за период с 1962 г. по настоящее время. «Космическое» сообщество изучает активность СО на основе спутниковых измерений начиная с 1978 г. В конце прошлого — начале нашего века было опубликовано достаточно много научных работ, которые показывали, что согласно наземным наблюдениям, значимые вековые тренды в активности СО отсутствуют, а согласно космическим — присутствуют. И здесь нужно отметить, что обработка космических измерений СО — дело нетривиальное, сопряженное с рядом объективных трудностей. В их число входят такие, как единая калибровка измерений, полученных различными спутниками, а также выбор порогового значения сигнала для идентификации присутствия или отсутствия слоя СО в анализируемых данных. Кроме того, активность СО сильно зависит от широты места наблюдения: например, частота появлений СО может увеличиваться в полярных широтах (65–90°), но оставаться неизменной в средних и приполярных широтах (50–65°).

Теперь рассмотрим долговременные наземные наблюдения СО в Московской области. Верхняя часть рис.5 показывает частоту появлений СО (число появлений СО, нормированное на число ясных и полужасных ночей за каждый летний сезон наблюдений). Хорошо заметно, что за период

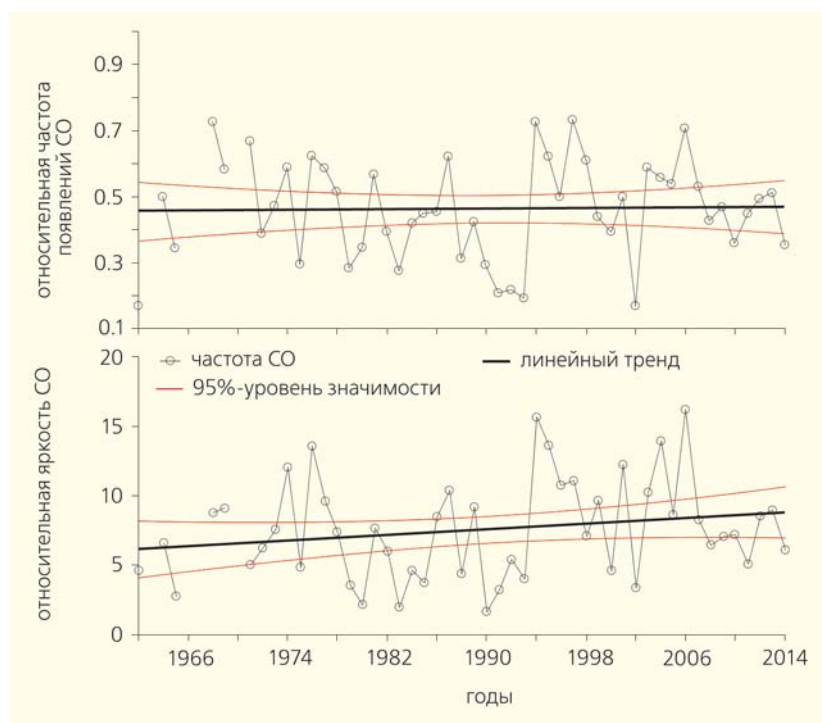


Рис.5. Характеристики серебристых облаков в Москве. Частота появлений облаков за период с 1962 по 2014 гг. (вверху, тонкая линия с кружочком) и их относительная суммарная яркость (внизу, тонкая линия с кружочком). Жирная черная линия — линейный тренд по времени, красные кривые — 95%-й доверительный интервал для трендов.

1962—2014 гг. долговременной тренд в частоте появлений СО близок к нулю (0.0002 ± 0.0029 число/год). Нижняя часть этого рисунка иллюстрирует относительную яркость СО в баллах (суммарную яркость СО, нормированную на число ясных и полужасных ночей за каждый летний сезон). Видно, что имеется слабый положительный долговременный тренд (0.051 ± 0.066 балл/год), но он статистически незначим. В наших предыдущих работах показано отсутствие статистически значимых трендов по другим независимым наблюдениям светящихся облаков в Дании, Литве, Канаде и Шотландии за последние два-три десятилетия, а обобщение этой важной темы представлено в недавней работе [11], где еще раз убедительно продемонстрировано, что значимого увеличения активности СО на 57—62° с.ш. нет.

В недавней публикации «космического» сообщества вырисовывается похожая картина [12]. Авторы тоже пришли к выводу, что за период 1979—2013 гг. статистически значимые вековые тренды отсутствуют как в частоте появлений, так и в яркости СО на средних и субполярных широтах в диапазоне 50—64° с.ш. Отметим, что в данной работе был использован новый критерий для порога регистрации сигнала СО, благодаря чему и были определены новые значения трендов, близкие к нулю и статистически незначимые (в противоположность результатам своих более ранних работ, показывающих статистически значимые положительные тренды в частоте и яркости СО в данном широтном диапазоне). Все эти новейшие достижения резюмированы в [11]. На самом деле противоречий между наземными наблюдениями и космическими измерениями СО не обнаруживается, если рассматривать один и тот же временной период их наблюдений на средних и субполярных широтах 50—64° Северного полушария.

И снова о глобальных климатических изменениях

Прежде всего мы должны сделать важное, на наш взгляд, замечание о сути климатических изменений, возможно, происходящих в земной атмосфере. Как известно, три главных парниковых газа (CO_2 , H_2O и CH_4) рассеивают обратно к поверхности Земли ее инфракрасное излучение, приводя таким образом к знакомому всем «парниковому эффекту» (рис.6). В том случае, если происходит увеличение концентрации парниковых газов, температура в нижней части атмосферы до высоты 10 км должна постепенно расти. Однако существует обратная сторона этого процесса: температура средней и верхней атмосферы должна постепенно уменьшаться одновременно с увеличением температуры в тропосфере. Данная схема показана в левой части рис.6: красная прямая линия схематично изображает увеличение температуры в тропосфе-

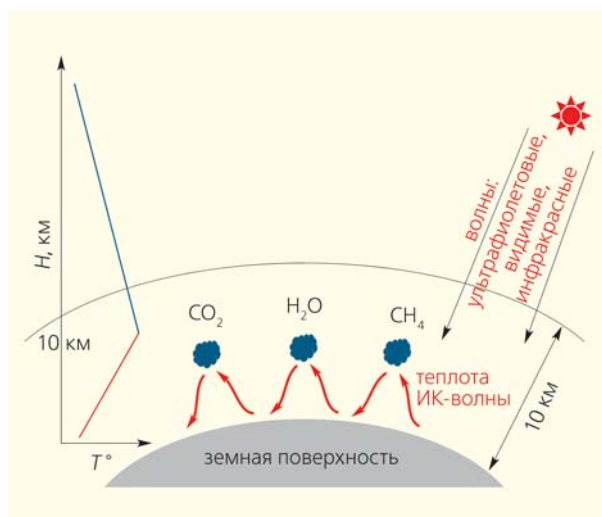


Рис.6. Структурная схема парникового эффекта и климатических изменений, возможно происходящих в земной атмосфере. Шкала слева показывает увеличение температуры (красная прямая) в нижней атмосфере (тропосфера до 10 км) и уменьшение температуры (синяя прямая) в средней и верхней атмосфере (выше 10 км).

ре, а синяя — уменьшение температуры в средней и верхней атмосфере. Этот очевидный эффект следует из закона сохранения энергии для теплового излучения, переизлучаемого поверхностью Земли в космическое пространство.

Выше мы обосновали, что статистически значимых трендов ни в яркости, ни в частоте появлений СО нет, что также верно и для спутниковых наблюдений СО в средних и субполярных широтах 50—64° с.ш. Яркость облаков — сильная степеньная функция от концентрации молекул воды (значение показателя степени зависит от различных подходов к моделированию формирования ледяных частиц в мезопаузе и варьируется в пределах от двух до восьми). В работе [11] показано: если существуют долговременные тренды в температурном и влажностном режиме в летней мезопаузе, они должны быть одного знака: либо оба отрицательные, либо оба положительные. Но пока долговременный тренд в температуре в области летней мезопаузы инструментально однозначно не определен, на вопрос о его существовании уверенно ответить нельзя.

Недавние модельные исследования [13] для области верхней мезосферы и мезопаузы показали: наряду со статистически значимым отрицательным многолетним (1961—2009) температурным трендом имеется и положительный тренд в концентрации водяного пара, что можно было бы объяснить увеличением метана в мезосфере из-за антропогенной активности. Однако, как мы отмечали выше, в реальности должны наблюдаться тренды или одного знака, или нулевые. Только в последнем случае можно объяснить наблюдаемую многолет-

нюю неизменность в яркости и частоте появлений серебристых облаков за последние полвека.

В настоящее время рассматриваемые вопросы о долговременных трендах в параметрах ночных облаков и в свойствах летней мезопаузы остаются открытыми и, несомненно, требуют дальнейших рядов наблюдений СО, а также нового моделирования физических и динамических процессов, происходящих в летней мезопаузе.

О пользе серебристых облаков

Часто приходится слышать прозаические вопросы: «Зачем наблюдать серебристые облака?» или «Какую пользу могут они принести народному хозяйству страны?». На них можно предложить следующие ответы. СО — тонкий атмосферный феномен и прекрасный естественный индикатор климатических изменений, возможно, происходящих в атмосфере нашей планеты. А это несомненно волнует значительное число людей. В настоящей статье мы показали, что за последние пять десятилетий активность СО практически не увеличилась, а если и увеличилась, то незначительно: небольшой положительный тренд в яркости СО определяется с большой статистической ошибкой. По-видимому, и сейчас существуют слабые изменения в температурно-влажностном режиме в области летней мезопаузы, но, чтобы заключить, насколько они значимы, нуж-

но проводить дальнейший мониторинг и изучение ночных светящихся облаков, с тем чтобы уменьшить статистическую ошибку характеристик вековых трендов. Вторым, а возможно, и первым по значению ответом служит тот факт, что тематика наблюдения серебристых облаков — это замечательная научно-прикладная дисциплина для подрастающего поколения. Мы знаем, что много школьников, студентов и просто молодых людей не спят летними ночами, а наблюдают эти завораживающие ночные облака. И совершенно правильно делают, поскольку индивидуальный наблюдатель с правильно организованной системой наблюдения СО за несколько лет способен внести ценный вклад в изучение статистических характеристик СО, предоставить важную для науки информацию о пространственно-временных свойствах ночных облаков. Ведь в наше время современные цифровые методы регистрации позволяют относительно просто и недорого наладить наблюдения СО с помощью простой цифровой камеры с технологией покадровой съемки. И конечно, не нужно забывать о культурно-образовательном аспекте в том плане, что организация небольших кружков юных наблюдателей СО позволит повысить уровень физико-астрономического образования школьников, развить аккуратность и дисциплину при проведении ночных наблюдений, а также привить замечательную привычку всматриваться в окружающий нас звездный купол в надежде разгадать тайны мироздания. ■

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 15-05-04975).

Литература

1. *Цераский В.К.* Астрономический фотометр и его приложения: Докторская диссертация // Математический сборник. 1887. Т.ХІІІ. П.21. С.626—631.
2. *Далин П.А., Перцев Н.Н., Ромейко В.А.* Открытие серебристых облаков: факты и домыслы // Пространство и время. 2013. Т.2. №.12. С.183—195.
3. *Ceraski W.* Sur les nuages lumineux // Annales de l'Observatoire de Moscou. 1890. Ser.2. V.2. P.177—180.
4. *Thomas G.E., Olivero J.J., Jensen E.J. et al.* Relation between increasing methane and the presence of ice clouds at the mesopause // Nature. 1989. V.338. P.490—492.
5. *Бронштэн В.А.* Серебристые облака и их наблюдение. М., 1984.
6. *Gadsden M., Schröder W.* Noctilucent clouds. N.Y., 1989.
7. *Rapp M., Thomas G.E.* Modeling the microphysics of mesospheric ice particles: assessment of current capabilities and basic sensitivities // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2006. V.68. P.715—744.
8. *Dalín P., Pertsev N., Zadorozhny A. et al.* Ground-based observations of noctilucent clouds with a northern hemisphere network of automatic digital cameras // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2008. V.70. P.1460—1472.
9. *Stevens M.H., Lossow S., Fiedler J. et al.* Bright polar mesospheric clouds formed by main engine exhaust from the space shuttle's final launch // Journal of Geophysical Research (D). 2012. V.117. P.D19206.
10. *Dalín P., Perminov V., Pertsev N. et al.* Optical studies of rocket exhaust trails and artificial noctilucent clouds produced by Soyuz rocket launches // Journal of Geophysical Research (D). 2013. V.118. P.7850—7863.
11. *Pertsev N., Dalín P., Perminov V. et al.* Noctilucent clouds observed from the ground: sensitivity to mesospheric parameters and long-term time series // Earth, Planets and Space. 2014. V.66. №.98.
12. *DeLand M.T., Thomas G.E.* Updated PMC trends derived from SBUV data // Journal of Geophysical Research (D). 2015. V.120. P.2140—2166.
13. *Lübken F.-J., Berger U.* Latitudinal and interhemispheric variation of stratospheric effects on mesospheric ice layer trends // Journal of Geophysical Research (D). 2011. V.116. P.D00P03.