



М. В. ПАНЧЕНКО, Б. Д. БЕЛАН

СМОТРЯЩИЕ

за
АТМОСФЕРОЙ

В конце прошлого – начале нынешнего века сначала ученые, а затем политики и люди, далекие от науки, все чаще начали говорить, что с погодой (то есть с климатом) что-то происходит. Насколько обоснованы эти опасения? Ведь, согласно народной мудрости, «климат глобально теплеет везде, где ты не живешь». Споры вокруг этого вопроса не утихают, но если действительно окажется, что мы живем в эпоху глобальных климатических перемен, это станет наиболее острой проблемой для всего живого на Земле. Для выяснения механизма климатических изменений нужны данные о состоянии и взаимодействии элементов сложнейшей системы, включающей океан, поверхность суши и атмосферу за длительный период. Таким климатическим мониторингом воздушного «одеяла» нашей планеты и занимаются исследователи из томского Института оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН

Человеку ничего не оставалось бы
требовать от бога,
если бы он научился правильно
предсказывать погоду.
М. В. Ломоносов

Кто должен заниматься проблемой изменения климата – синоптики, метеорологи, климатологи?

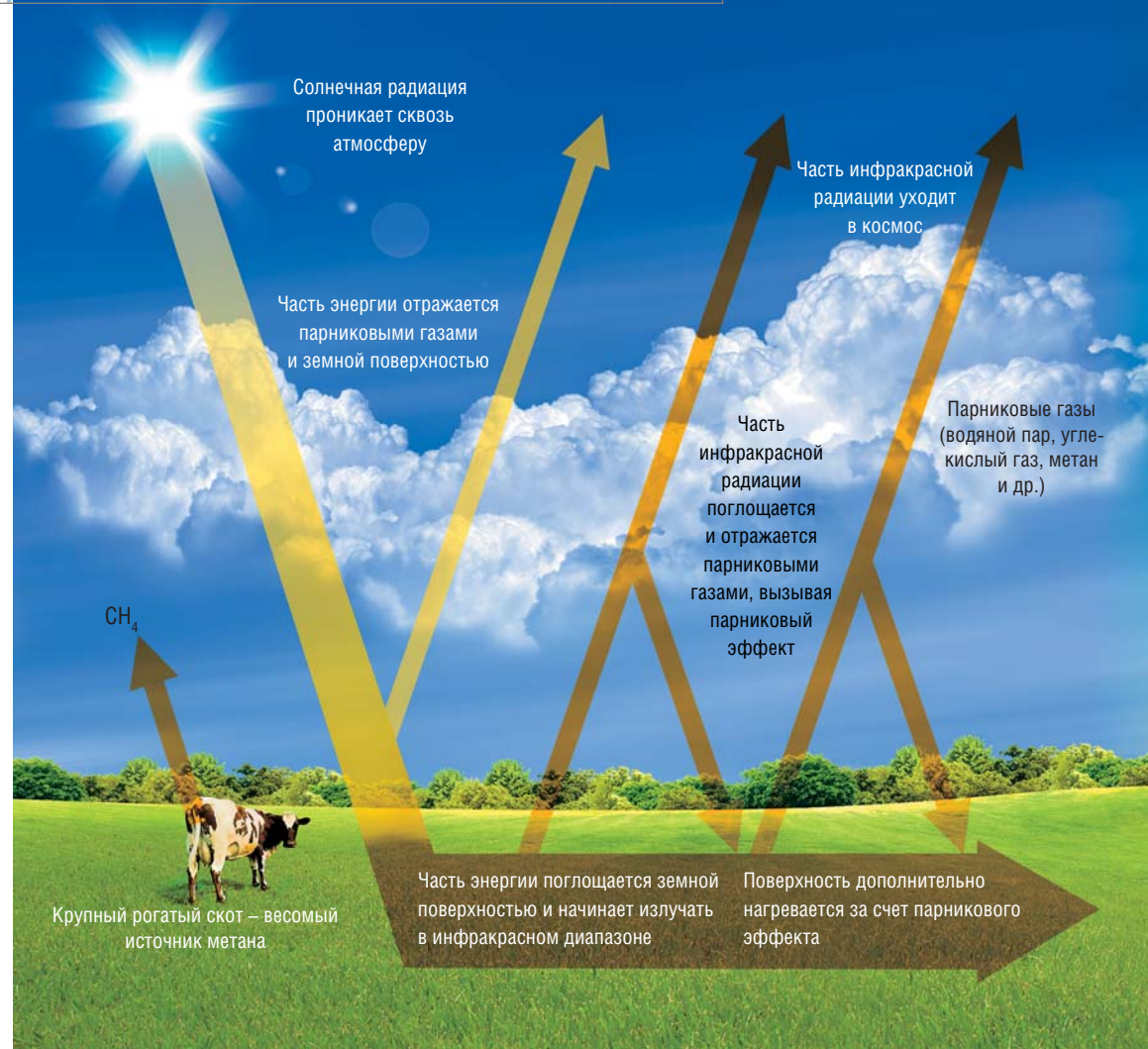
Какое отношение к этой теме могут иметь физики из томского Института оптики атмосферы им. В. Е. Зуева (ИОАТ) СО РАН? Ведь этот академический институт был создан для решения масштабных задач по изучению оптических свойств атмосферы, ставших особенно значимыми в связи с бурным развитием оптико-электронных систем. Чтобы ответить на эти вопросы, давайте обратимся к цифрам.

На верхнюю границу атмосферы падает около 1.5 кВт солнечной энергии, причем около трети этой энергии наша планета отражает обратно в космос. Естественно, что благодаря поглощенной энергии Земля нагревается



ПАНЧЕНКО Михаил Васильевич – доктор физико-математических наук, заместитель директора по науке Института оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН (Томск). Область научных интересов – радиационные составляющие климата и оптическая диагностика окружающей среды. Автор и соавтор более 300 научных работ

БЕЛАН Борис Денисович – доктор физико-математических наук, заместитель директора по науке Иститута оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН (Томск). Область научных интересов – исследование аэрозолей и парниковых газов. Автор и соавтор более 300 научных работ



Упрощенная схема радиационного блока – «солнечное излучение–атмосфера–земная поверхность». Без детального исследования всех процессов отражения, поглощения и рассеивания солнечной энергии, поступающей на Землю, невозможно дать точный прогноз возможных климатических изменений

до определенной температуры и, как любое нагретое тело, в свою очередь начинает излучать энергию. Теперь представим, что земной атмосферы не существует, а в энергетической системе «поглощение–излучение» установилось равновесие. Решив эту климатическую задачу, мы получим, что расчетная средняя температура земной поверхности должна при этом составлять около $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (реальная температура равна примерно $15\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Таким образом, без привлечения данных о свойствах атмосферы нам не удастся получить правдоподобный результат. Какие свойства имеются в виду? В первую очередь – способность атмосферы пропускать или

задерживать солнечное излучение. Необходимо иметь полную информацию о процессах в так называемом *радиационном блоке* – «солнечное излучение–атмосфера–земная поверхность». Отметим, что основная часть солнечной энергии поступает на земную поверхность в *видимой области* спектра, а планета излучает в космическое пространство в *инфракрасном* диапазоне. А это и есть те области, в которых работают оптики.

Облака и подавляющее число аэрозольных частиц, присутствующих в атмосфере, очень слабо поглощают солнечный свет в видимой области спектра; они рассеивают и отражают излучение обратно в космическое пространство. Таким образом, в климатическом плане они играют роль «выхолаживающего» фактора.

Сажа и так называемые *парниковые газы* (водяной пар, метан, углекислый газ и др.) действуют обратным образом. Практически беспрепятственно пропуская энергию в видимой области, они поглощают ее в инфракрасном диапазоне, в котором излучает сама планета. В результате они играют для Земли ту же роль, что и пленка на теплицах.

Именно радиационный блок, задающий внутригодовой ход термического состояния атмосферы и подстилающей поверхности, является одним из наиболее важных элементов во всех моделях общей циркуляции атмосферы. Процессы, происходящие в этом блоке, служат сегодня предметом ожесточенных споров, связанных с попытками понять причины межгодовых изменений климата. Именно здесь лежат и истоки широко известного «Киотского протокола», регулирующего объемы выбросов парниковых газов...

Не ввязываясь в очередную дискуссию, отметим, что срок корректных инструментальных наблюдений за составом атмосферы еще очень мал, и сеть наблюдательных станций тоже невелика. Успешность же прогноза климатических изменений в итоге будет определяться надежностью и достоверностью сведений об оптических параметрах атмосферы и их изменчивости под влиянием внешних факторов. Учитывая огромное разнообразие состава и источников атмосферных газов и частиц, их высокую пространственно-временную изменчивость, очевидно, что наиболее достоверные сведения о характеристиках атмосферных составляющих и их трансформации под действием комплекса геофизических процессов на сегодняшний день можно получить только масштабными прямыми измерениями.

География экспедиционных работ исследователей из Института оптики атмосферы СО РАН впечатляет – от Арктики до Антарктики

АТМОСФЕРНЫЙ АЭРОЗОЛЬ – взвешенные в воздухе твердые и жидкие коллоидные частицы размерами от 10^{-3} до 10^{-1} см. Особую роль играют высокодисперсные частицы размером до десятых долей микрона. Они влияют на тепловой режим атмосферы, служат ядрами конденсации воды в облаках, определяя динамику влаги в атмосфере, являются основными носителями атмосферного электричества и радиоактивности.

Наиболее разнообразны по структуре и физико-химическим свойствам аэрозоли антропогенного происхождения, при этом с развитием промышленности и транспорта их вклад в общее содержание атмосферного аэрозоля постоянно растет.

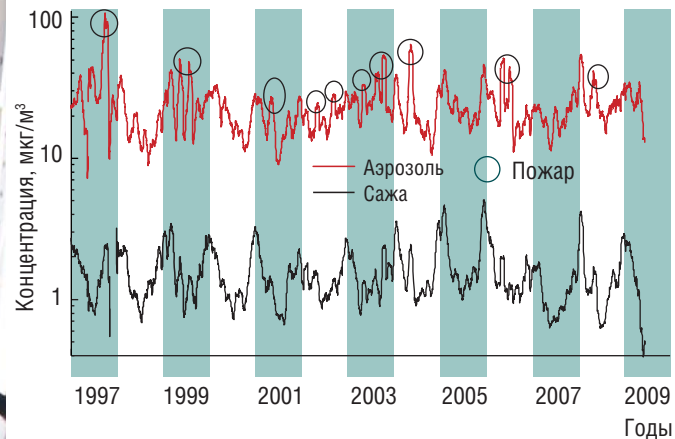
С помощью искусственных аэрозолей теоретически возможно направленно воздействовать на такие атмосферные процессы, как ураганы, град, катастрофические ливни и другие опасные природные явления, но на практике используются только методы воздействия на облака и туманы

Атмосфера границ не имеет

Сибирь с ее уникальным разнообразием природно-климатических зон и огромными пространствами представляет собой сложный объект даже для географического описания. Что же касается атмосферы, которая, как известно, границ не имеет, то на нее воздействуют не только местные природные и антропогенные факторы. Сибирь находится под влиянием атмосферного переноса из западных районов; она открыта как для арктического воздуха, так и для пыльных бурь с юга. Все это многократно затрудняет работу исследователей.

Создать здесь широкую сеть мониторинговых станций сегодня невозможно по причинам экономического и технического характера. Выход был найден в создании небольшого числа оптимально подобранных исследовательских точек, работающих в мониторинговом режиме. Мониторинг дополняется постановкой крупных комплексных исследований, где максимально используются





Судя по данным одной из приземных аэрозольных станций сети АЭРОСИБНЕТ (Томск, Академгородок), средний региональный аэрозольный «фон» и его годовая изменчивость из года в год хорошо воспроизводятся. Из этих же данных видно, какой атмосферный «стресс» вызывают лесные и торфяные пожары

Даешь АЭРОСИБНЕТ!

Получить данные о параметрах атмосферного аэрозоля помогают методы *солнечной фотометрии*, основанные на измерении проходящего через атмосферу солнечного света. Анализ спектральных и угловых характеристик прямого и рассеянного излучения дает информацию о содержании частиц во всей толще атмосферы, а также позволяет оценить их распределение по размерам, рассеивающую и поглощательную способность и другие характеристики.

Давняя мечта томских оптиков заняться широко-масштабными аэрозольными измерениями стала явью в фантастически короткие сроки благодаря энтузиазму Б. Холбена – руководителя сети *AERONET*, международной глобальной сети автоматизированных солнечных фотометров, организованной NASA (США). Эта сеть в настоящее время включает в себя 150 станций. Оставив в стороне трудности, которые пришлось преодолеть при создании сети АЭРОСИБНЕТ, отметим, что сейчас она раскинулась от Звенигорода до Приморья.

При создании Сибирской фотометрической сети использовалась следующая стратегия. Поскольку *AERONET* нацелена на получение длинных рядов фоновых аэрозольных характеристик, то пункты установки фотометров обычно выбираются в местах, удаленных от городов и промышленных центров. Но полученная таким образом картина пространственного распределения аэрозоля не совсем совпадает с реальностью. Поэтому в наиболее интересных географических точках, в том числе и вблизи городов, были дополнительно размещены фотометры, созданные в ИОАТ СО РАН,

«Жизнь» подавляющего большинства атмосферных частиц начинается в приземном слое и нижних слоях атмосферы. Они рождаются на морских и океанских просторах из лопающихся на поверхности пузырьков воздуха и капель, срываемых с морских волн; их источниками становятся мощные пылевые бури и дым пожаров и т. п. Безусловно, не остается в стороне и антропогенное воздействие: выхлопные газы и промышленные выбросы. Поэтому исследование оптических характеристик атмосферы вблизи крупных населенных пунктов представляет несомненный интерес.

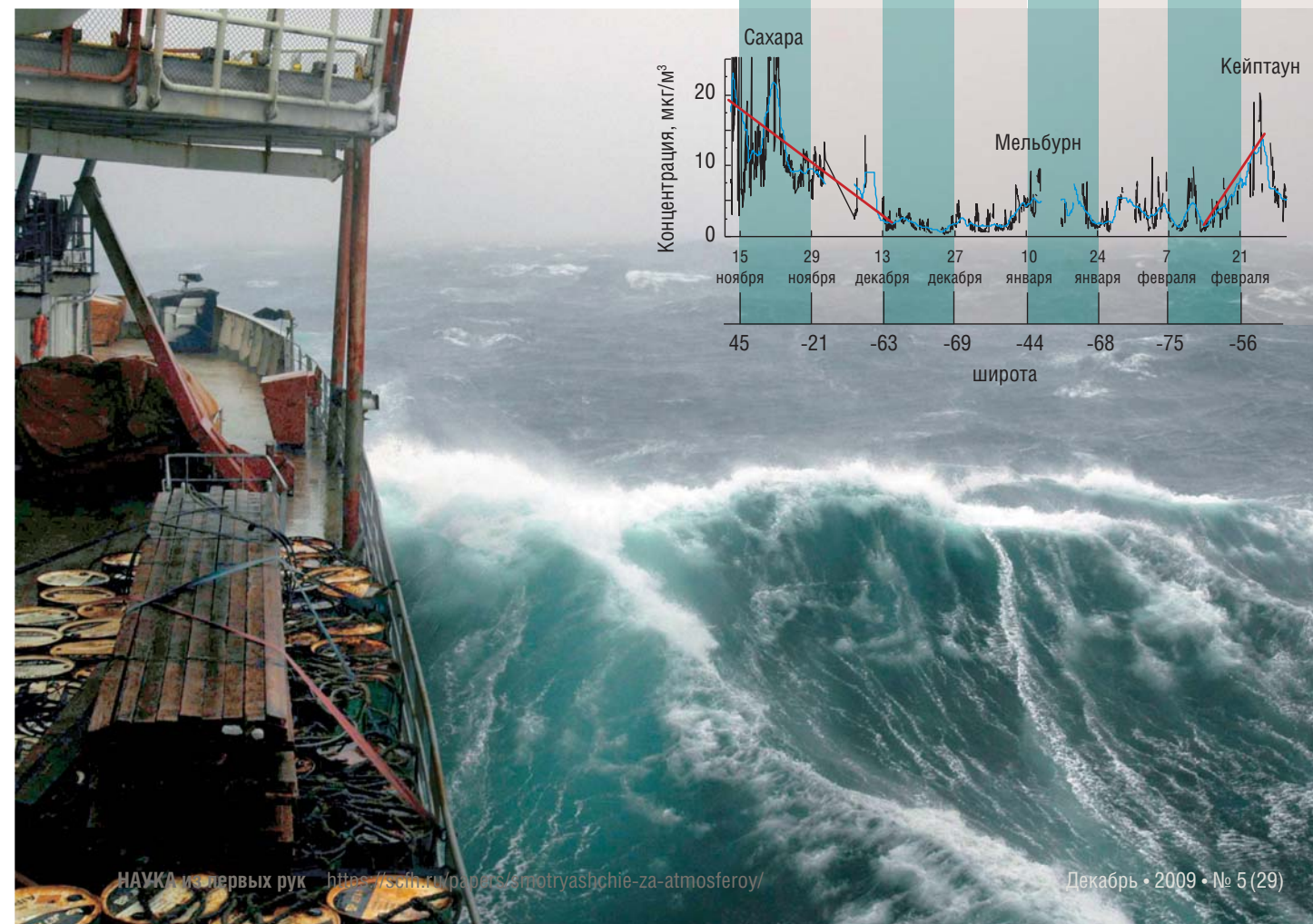
Воздушными потоками аэрозольные частицы выносятся вверх и разносятся на огромные расстояния. Жизнь их заканчивается в тропосфере под действием процессов оседания, осаждения, облачного и подоблачного вымывания. Для того чтобы в деталях исследовать эти процессы и оценить степень влияния различных внешних факторов, вблизи г. Томска уже более 10 лет работают в рутинном автоматическом режиме две станции, оборудованные комплексом приборов для приземных измерений. Они ежечасно определяют параметры аэрозоля в приземном слое атмосферы.

Серьезным дополнением к сетевым наблюдениям являются и ежемесячные полеты самолета-лаборатории, где одновременно измеряются и аэрозольные характеристики, и содержание парниковых газов.

Под парусами – за аэрозолем

У мониторингового режима есть один недостаток – его результаты соответствуют лишь тем конкретным географическим условиям, где расположены станции наблюдения. Получить полное представление обо всем многообразии аэрозольных ситуаций невозможно без проведения экспедиционных работ. А учитывая, что большая часть поверхности нашей планеты покрыта океаном, пришлось уделить особое внимание организации судовых измерений.

Благодаря трем судовым экспедициям в Южное полушарие удалось выявить широтное распределение аэрозольной оптической толщи над океаном. Оказалось, что массовая концентрация аэрозоля убывает от экватора в направлении Южного полюса



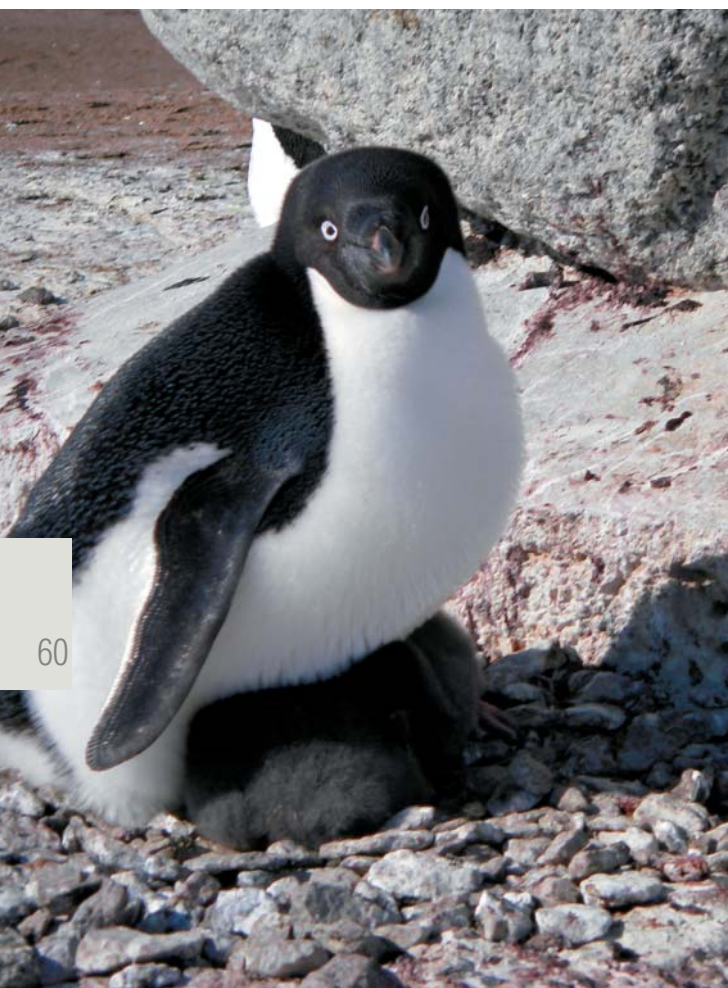
все доступные системы для измерения основных климатически значимых параметров атмосферы. Кроме того, в экспедиционном режиме активно работают мобильные лаборатории, базирующиеся на наземных, судовых и воздушных транспортных средствах.

Такая постановка исследований на обширной территории позволяет получать данные для разработки хорошо обоснованных прогностических моделей. Что касается мониторинга, то в академической среде не утихают споры о том, нужно ли учреждениям, призванным решать фундаментальные задачи, напрямую заниматься его организацией.

Но, с одной стороны, сейчас в России нет другой квалифицированной силы, которой бы эта задача оказалась по силу. С другой стороны, при интерпретации результатов исследования атмосферных явлений без данных многоточечных рутинных измерений не обойтись и самим ученым. Ведь если вы обнаружите, что каждый день в двенадцать часов дня концентрация сажи в какой-то точке наблюдения резко возрастает, то вы должны быть уверены, что причина этого – реальное атмосферное явление, а не добросовестный работник кочегарки по соседству, перед обеденным перерывом подбрасывающий в топку уголек.



Любая информация о составе атмосферы труднодоступного края «полярных сияний и пингинов» ценится очень высоко



Вот весомый перечень морских экспедиций томских исследователей: Белое море (2003–2007 гг.), Карское море (2007 г.), Каспийское море (2008 г.), Тихий океан (2009 г.). Для описания полученных результатов не хватило бы и обширного тома, но сейчас остановимся на нескольких примерах.

Как это ни странно звучит, но коллективу, живущему и работающему вдали от всех океанов, первому удалось собрать подробную информацию и провести районирование Северной Атлантики по оптическим характеристикам атмосферы. Исследование Белого и Карского морей позволило оценить воздействие выносов, в том числе и антропогенных, на состав атмосферы в этом регионе Арктики.

Что касается антарктических районов, то любая, даже отрывочная информация о составе атмосферы в здешних широтах ценится на вес золота, благодаря трем экспедициям в Южное полушарие удалось путем прямых измерений выявить широтную зависимость характеристик аэрозольной оптической толщи и содержания сажи над океаном.

Такие данные очень нужны, чтобы понять, каким образом континенты влияют на атмосферу, в том числе на картину глобального распределения аэрозоля. В частности, обнаруженный факт более медленного по сравнению с другими атмосферными частицами убывания концентрации сажи от экватора к Антарктиде заставило пересмотреть распространенные представления о том, что сажа и аэрозоль не могут «жить» друг без друга.

Парниковые газы

История мониторинга парниковых газов, организованного учеными из ИОАТ СО РАН, практически полностью повторяет историю с аэрозолем. Только в этот раз счастливый случай свел томичей с известным японским ученым Г. Иноэ из Национального института исследования окружающей среды, который развернул масштабные работы в Сибири в рамках Международной геосферно-биосферной программы (IGBP). С его помощью удалось продолжить ежемесячные экспедиционные исследования на самолете-лаборатории.

Судя по результатам многолетнего самолетного зондирования основных парниковых газов (углекислого газа и метана), наблюдаемый над территорией Сибири рост CO_2 эквивалентен значению, которое фиксируют все станции Земли. Но вот резкого роста концентрации метана, о котором так много говорится в научном мире, не было обнаружено.

Факт отсутствия межгодового прироста содержания метана в приземном слое атмосферы весьма неожидан для территории, где расположены самые крупные в полушарии Васюганские болота. Ведь обитающие в болотах бактерии-метаногены являются одним из основных источников биогенного метана наряду с бактериями, заселяющими пищеварительный тракт жвачных животных.

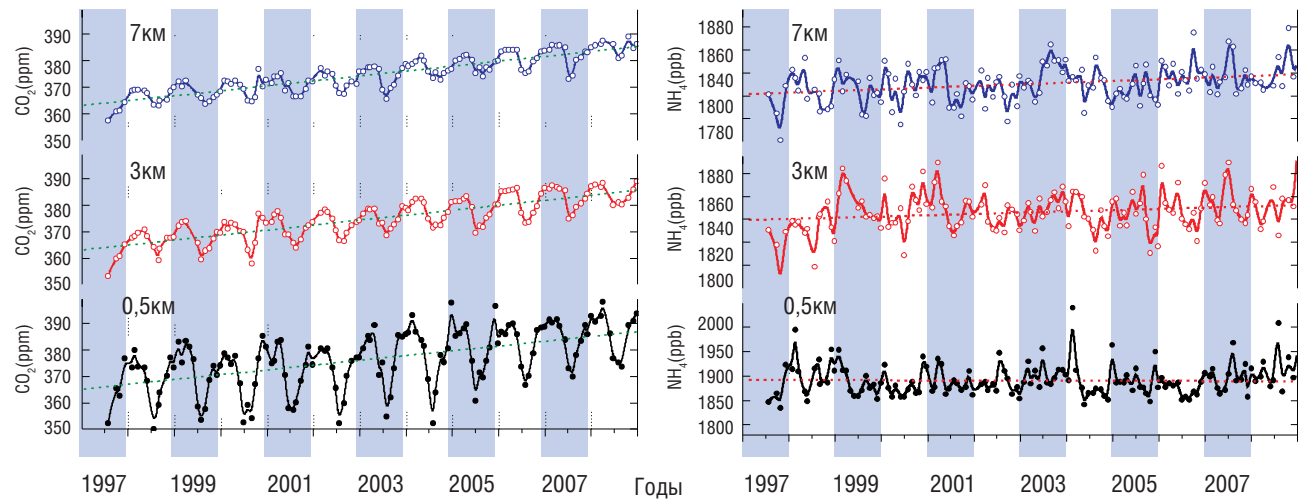
Здесь уместно упомянуть, что одним из основных источников метана в настоящее время действительно является... крупный рогатый скот, на который приходится до трети мировых выбросов этого парникового

газа. Парниковые газы – газообразные составляющие атмосферы, поглощающие и переизлучающие инфракрасное излучение. Предположительно именно они отвечают за глобальный парниковый эффект.

Основной естественный парниковый газ – водяной пар. В числе наиболее активных парниковых газов – углекислый газ и метан, при этом метан способен поглотить и переизлучить в двадцать раз больше тепла, чем CO_2 . Атмосферные концентрации углекислого газа за последние 250 лет увеличились примерно на треть, метана – в полтора раза, что связывают с увеличением антропогенных выбросов в атмосферу

Судя по благодушной морде, этот антарктический тюлень явно еще ничего не знает о глобальном потеплении, угрожающем ледяным шапкам нашей планеты





газа. (Мировая общественность настолько озабочена «коровьими выбросами», что, например, канадские ученые сегодня работают над выведением коров, которые будут производить на четверть меньше метана, чем их современные «коллеги» (Ellis et al., 2009).) Так что судя по содержанию метана, с коровьим поголовьем дела в Сибири обстоят неважно...

Благодаря сотрудничеству с японскими коллегами томским исследователям удалось создать сеть высотных мачт, оборудованных комплексом автоматических приборов для измерения концентрации парниковых газов и их потоков. Схема размещения наблюдательных станций в виде своеобразной решетки, вытянутой с юга на север, позволяет не только детально изучить

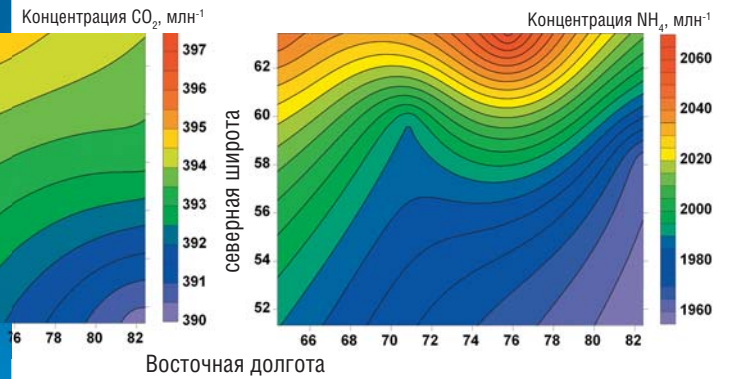
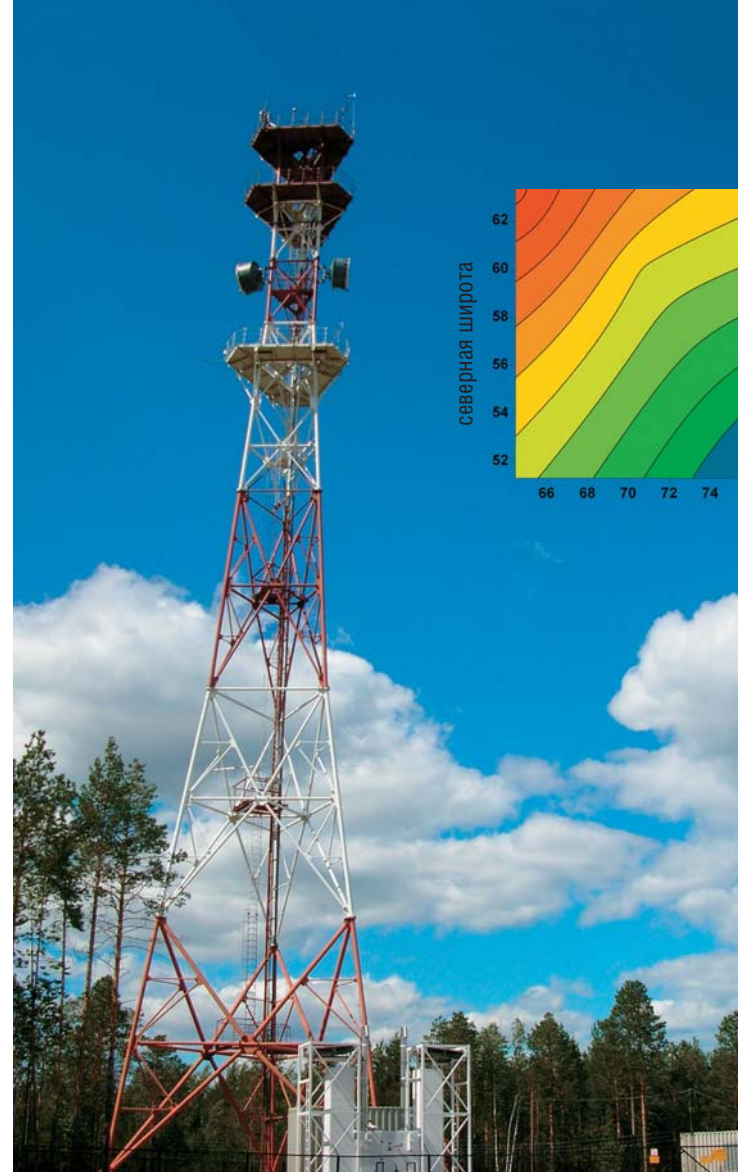
региональные особенности пространственного распределения газов, но и оценить их поступление по основному воздушному потоку нашего полушария, т.е. с запада на восток. А, как известно, западные районы на нашем материке – самые промышленно развитые и, соответственно, производят самый большой объем промышленных выбросов.

Кстати сказать, изучение процессов переноса газов и загрязняющих атмосферу примесей задача трудная, поскольку он зависит от режима циркуляции воздушных масс на различных высотах. И здесь без самолета не обойтись, поэтому совместно с учеными из Национального центра научных исследований Франции (CNRS) был начат новый цикл самолетных экспедиций по сибирскому



Результаты самолетного зондирования концентрации основных парниковых газов в тропосфере Западной Сибири свидетельствуют о росте здесь концентрации углекислого газа, что соответствует мировой тенденции (слева). Однако рост концентрации метана при этом не был обнаружен (справа)

В публикации использованы фотографии из архива М.В. Панченко



Для мониторинга концентрации парниковых газов и их потоков создана сеть наблюдательных станций с высотными мачтами, оборудованными комплексом автоматических приборов. Это позволило оценить особенности пространственного распределения углекислого газа и метана в региональном масштабе и характер их поступления из западных промышленно развитых районов

поддержке в рамках программ РАН удалось в течение последних 10 лет провести не имеющий мировых аналогов цикл комплексных исследований на Байкале; организовать экспедицию в пустыню Гоби и три экспедиции в Антарктиду; провести судовые измерения в Белом, Карском и Каспийском морях.

Безусловно, значимость материальной базы трудно переоценить. Но она мертва без действующей инфраструктуры и, конечно, людей – тех, кто ежедневно ведет наблюдения, поддерживает работоспособность приборов, квалифицированно анализирует полученные данные. И в этом томским ученым из ИОАТ СО РАН оказали огромную поддержку их азартные и глубоко увлеченные коллеги из ряда других российских научных организаций.

Сегодня уже немало известно о состоянии и динамике атмосферы – одного из ключевых элементов механизма планетарного климат-контроля, но, по большому счету, мы стоим лишь в начале длинного пути. Тем не менее изучать, что сегодня происходит с атмосферой и климатом в целом, жизненно необходимо для человечества. Ведь от этого знания может во многом зависеть, какой завтра будет «погода» в нашем общем доме – планете Земля.

Северу в рамках проекта YAK-AEROSIB «Изучение углеродного и озонового цикла в Евразии».

В результате, например, удалось обнаружить на территории Сибири обширную (в сотни километров) область загрязненного воздуха, проникающего сюда из Северного Китая и Восточной Монголии.

Из всего вышесказанного может сложиться впечатление, что оптические исследования атмосферы осуществлялись исключительно благодаря западной финансовой поддержке. Это далеко не так. В трудные 1990-е гг. экспедиционные работы продолжались благодаря своевременной поддержке Сибирским отделением Академии наук. В дальнейшем большую роль сыграло финансирование по интеграционным проектам СО РАН, что позволило не только развернуть работу фотометрической сети, но и осуществить ряд интересных комплексных экспериментов (пример – исследование 2009 г., где были одновременно задействованы наземные комплексы и парусная шхуна «Надежда»). А благодаря целевой