



МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
(Росгидромет)

ФГБУ «ЦЕНТРАЛЬНАЯ АЭРОЛОГИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ»

САМОЛЕТ-ЛАБОРАТОРИЯ ЯК-42Д «РОСГИДРОМЕТ» В СИСТЕМЕ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ



Долгопрудный, 2013 г.

Самолеты–лаборатории являются одним из эффективных средств измерения параметров окружающей среды, дающих возможность оперативного получения комплексной информации на больших площадях, в том числе в труднодоступных и удаленных районах. Самолётные наблюдения относятся к так называемым целевым наблюдениям ("adaptive targeted observations" – адаптивные целевые наблюдения), когда измерения проводятся в определённое время, вдоль заранее спланированного маршрута и на заданных воздушных эшелонах. Такими возможностями обладает самолет – лаборатория ЯК-42Д «Росгидромет», созданный на ОАО "Экспериментальный машиностроительный завод им. В.М. Мясищева".



Техническое оснащение самолёта-лаборатории включает в себя аппаратно-программные комплексы для измерения газового и аэрозольного состава атмосферы, потоков рассеянной солнечной радиации, термодинамических параметров атмосферы, микрофизических параметров облаков, радиоактивности и атмосферного электричества, параметров подстилающей поверхности и океана.

Воздушная лаборатория на базе самолёта ЯК-42Д «Росгидромет» по своему оснащению соответствует современным западным аналогам и позволяет эффективно решать широкий спектр научных и прикладных задач геофизического мониторинга окружающей среды. Научные направления исследований, в которых самолетные измерения играют важнейшую роль, включают практически все разделы физики и химии атмосферы:

- Перенос радиации в безоблачной и облачной атмосфере
- Химия тропосферы и загрязнения атмосферы
- Тропосферно-стратосферный обмен
- Физика облаков и динамика атмосферы
- Пограничный слой и турбулентность
- Активные воздействия на облака и атмосферные процессы
- Атмосферное электричество
- Радиоактивные загрязнения атмосферы и подстилающей поверхности
- Альbedo подстилающей поверхности

Ниже сформулирован основной перечень перспективных направлений работ по мониторингу состояния окружающей среды с использованием самолета лаборатории ЯК-42Д «Росгидромет».

Валидация спутниковых данных дистанционного зондирования Земли

Это одна из важнейших проблем, которая должна быть решена для принятия решения о вводе в штатную эксплуатацию российской метеорологической космической системы. В соответствии с Федеральным законом от 26 июня 2008 года №102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» данные космических наблюдений с метеорологических спутников, в случае отсутствия такой процедуры, не могут быть использованы для контроля природной среды. Для того, чтобы принять решение о вводе космических средств измерений в штатную эксплуатацию необходимо провести их валидацию и получить метрологически аттестованные оценки погрешностей измерения основных тематических параметров, необходимых потребителям космической информации. При этом важно получить подтверждение соответствия полученных оценок погрешностей точностным требованиям к тематической продукции, которые разработаны Всемирной метеорологической организацией (ВМО) и одобрены российскими организациями и службами - потребителями космической информации (Росгидромет, Минприроды,

Минсельхоз, МЧС и другие ведомства).

В США, Европе, Японии и других странах вопросам валидации космических измерений уделяется большое внимание и для принятия решения о вводе космических средств в эксплуатацию проводится специальные программы подспутниковых самолетных измерений. Использование самолета-лаборатории выгодно отличается от других методов сертификации космических измерений (наземных, аэростатных, ракетных) тем, что самолетная аппаратура может измерять вертикальное и горизонтальное распределение параметров окружающей среды с точно заданной подспутниковой траекторией измерений. Вместе с тем комплексирование подспутниковых самолетных измерений с баллонными и наземными наблюдениями значительно расширяет высотный диапазон программ по валидации и повышает их доказательную базу.

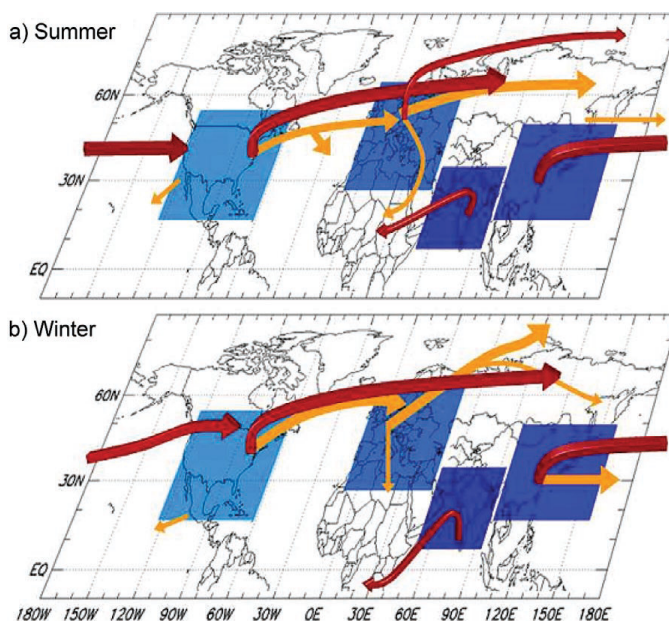
На самолете-лаборатории ЯК42Д «Росгидромет» используются все без исключения методы измерения параметров окружающей среды: контактные, дистанционные – пассивные и активные. Для подтверждения технических характеристик космической аппаратуры и параметров тематической продукции ДЗЗ научным оператором самолета-лаборатории - ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория» Росгидромета могут быть применены самые современные технологии и методы выполнения самолетных валидационных работ. В частности, с учетом установленной и планируемой для установки аппаратуры метеорологического назначения на российских космических аппаратах, с помощью самолета-лаборатории ЯК-42Д «Росгидромет» может быть выполнен, в разных географических регионах и высотных диапазонах, с заданной дискретностью по высоте и погрешностями измерений, широкий спектр работ по валидации тематической продукции:

- вертикальные профили температуры, влажности, ветра и давления, высота верхней границы облаков,
- альbedo подстилающей поверхности, параметры радиационного баланса в атмосфере.
- интегральное содержание малых газовых составляющих атмосферы (CO₂, CH₄, CO, O₃, NO, NO₂, H₂O, ХФУ и др.) и высотное распределение концентраций этих составляющих.
- зоны выпадения осадков и их интенсивность;
- направление и скорость ветра на трех уровнях (по информации, поступающей с геостационарных КА);

- пространственно-временное распределение параметров электрического поля Земли;
- электрическое состояние конвективной облачности в заданном районе.

Мониторинг трансграничного переноса загрязнений в атмосфере на территорию РФ

Поскольку самолётные измерения могут проводиться как внутри пограничного слоя, так и в свободной тропосфере, это дает возможность исследовать как локальные, так и удалённые источники загрязнений атмосферы. На рисунке 1 представлена климатология крупномасштабного переноса воздушных масс из основных промышленных регионов Северного и Южного полушария для летнего и зимнего периодов, полученная на основе данных реанализа и модельных расчётов. Жёлтые стрелки на рисунке иллюстрируют перенос в пограничном слое, а красные — в свободной тропосфере. Как видно из рисунка, на всех высотах воздушные массы из Европы и Северной Америки перемещаются на восток и переносят загрязнения на территорию РФ.



*Рисунок 1 Доминирующие направления переноса загрязнений
в летний (а) и зимний(б) периоды*

Кроме всесезонных динамических процессов, определяющих состав атмосферы над территорией РФ, также свой вклад вносят ярко выраженные сезонные процессы. Например, загрязненные воздушные массы в Юго-Восточной Азии (CO , CO_2 , аэрозоль и

т.д.) под действием конвекции в период муссонов (июль-август) поднимаются в верхнюю тропосферу и перемещаются в северо-западном направлении, включая территорию РФ (рисунок 2).

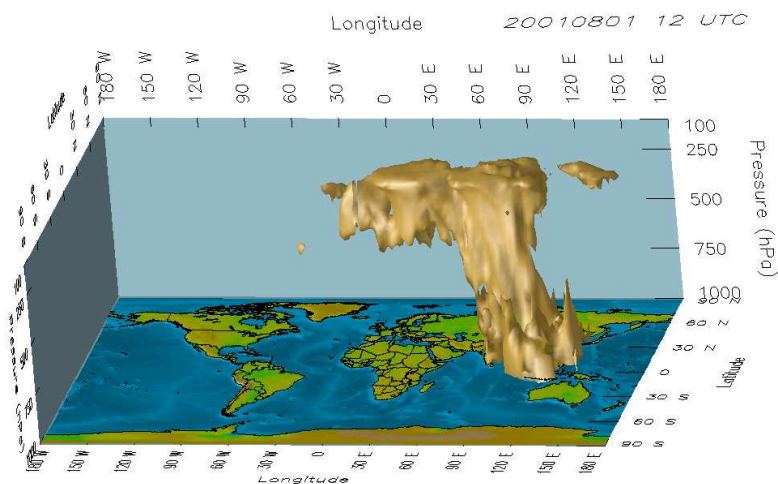


Рисунок 2 Перенос загрязнений из юго-восточной Азии в период муссонов.

Как видно из рисунка 1 в зимний период загрязнённые приземные воздушные массы перемещаются также и на северо-восток. Кроме того, в этот период в верхней атмосфере формируется полярный вихрь, втягивающий в себя тропические воздушные массы вследствие меридиональной циркуляции. В этой связи особый интерес представляют арктические широты, где изменения состава атмосферы и региональные климатические изменения более заметно выражены. В настоящее время существует целый ряд открытых вопросов, связанных с переносом воздушных масс в Арктику, химией приземного слоя и свободной тропосферы в Арктике. Наиболее существенные из них: формирование в нижней тропосфере Арктической дымки, дальний перенос и осаждение субмикронной фракции углеродных частиц (черная сажа) на подстилающую поверхность и связанное с этим эффектом изменение альбедо.

Весенние эмиссии бромных составляющих из соляного аэрозоля, снежных и ледяных масс Арктического бассейна приводят к практически полному удалению озона из приземного слоя. Наблюдаемые со спутников локальные увеличения концентрации окиси брома в нижней тропосфере Арктики до недавнего времени принято было ассоциировать с указанными эмиссиями. Однако, как показали недавние самолетные эксперименты, проведенные учеными Национального космического управления США, локальные увеличения концентрации окиси брома могут быть связаны с его переносом из стратосферы. Очевидно, что для уточнения химических процессов, происходящих в

Арктической тропосфере необходимы более представительные данные самолетных измерений и их дальнейший анализ.

В этой связи предлагается проведение серии самолётных экспериментов в различные сезоны в Арктике и прилегающих регионах для зондирования загрязненных воздушных масс, основываясь на прогностических и климатологических данных. Для пространственной идентификации загрязненных воздушных масс и валидации прогностических транспортных моделей измерения должны также проводиться в незагрязненных (фоновых) регионах Северного полушария.

Таким образом, на основе самолётных измерений и модельных расчётов можно оценить вклад трансграничного переноса примесей, который может оказаться намного существенней влияния локальных источников загрязнений.

Ниже на рисунке 3 Приведена предлагаемая схема полетов самолета ЯК-42Д, максимально учитывающая направление западного, а также северо-западного и юго-западного переносов с целью мониторинга трансграничного переноса загрязняющих примесей со стороны европейских стран.



Рисунок 3 Маршрут полетов самолета-лаборатории для мониторинга западного трансграничного переноса

Мониторинг воздействий выбросов загрязняющих газов и аэрозолей от крупных промышленных предприятий на территории РФ на состав тропосферы.

Использование самолета-лаборатории ЯК-42Д для этой цели имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с локальными и дистанционными наблюдениями на сети наземных станций. Самолётные измерения с использованием прогностических расчётов по транспортным и мезомасштабным моделям позволят определять концентрацию примесей при пересечении шлейфов от промышленных объектов на различных удалениях с высоким пространственным разрешением. При пролётах вдоль шлейфов могут быть изучены процессы фотохимической трансформации примесей, образования вторичного аэрозоля в загрязнённом воздухе, а также особенности и масштабы антропогенного влияния на окружающую среду.

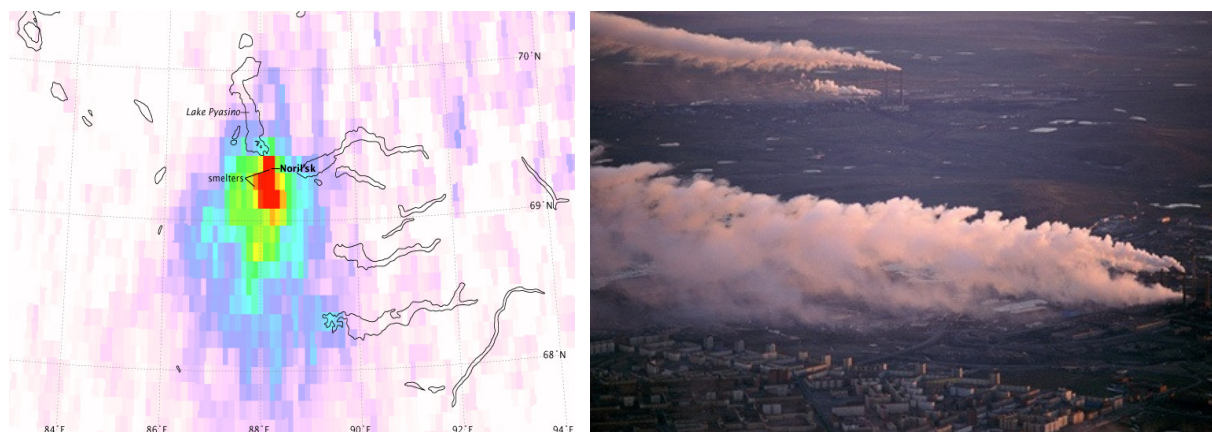


Рисунок 4. Распространение загрязнений в районе г. Норильск



Рисунок 5 Снимок факела («горячей точки») от сжигания попутного нефтяного газа со спутника SPOT 4

На рисунке 4. представлены снимок очага загрязнений и дымовые шлейфы в районе города Норильск. Аналогичные картины (так называемые «горячие точки») наблюдаются при сжигании попутного нефтяного газа (ПНГ) вблизи многочисленных нефтедобывающих скважин на Арктическом шельфе, в Западной Сибири (рисунок 5).

При сжигании ПНГ образуются сажа, оксиды азота, монооксид углерода, бенз(а)пирен, остаточные вследствие неполного сгорания углеводороды, бензол, фосген, толуол, тяжелые металлы (ртуть, мышьяк, хром), сернистый ангидрид, иногда сероводород, сероуглерод, меркаптаны. Масштабы антропогенного влияния таких очаговых загрязнений на окружающую среду наиболее эффективно могут быть исследованы на основе анализа спутниковых снимков с картированием «горячих точек», оценкой мощности выбросов попутного газа по температуре факелов и расчётов переноса выбрасываемых примесей по транспортным моделям.

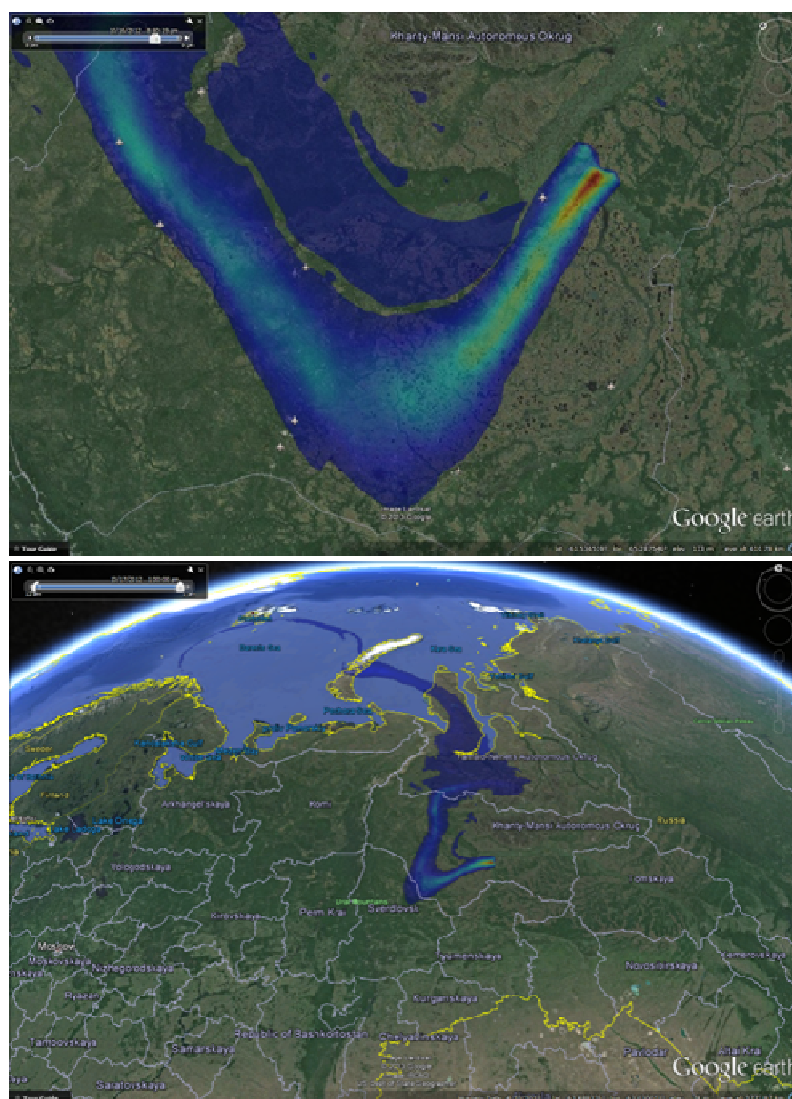


Рисунок 6 Перенос продуктов горения ПНГ в атмосфере в слое от 0 до 10 км от стационарных источников выбросов, расположенных в Ханты-Мансийском АО, через два дня (верхний рисунок) и через 5 дней (нижний рисунок) по данным расчетов с помощью траекторной модели.

Однако, эта технология мониторинга воздействия выбросов на окружающую среду требует валидации модельных расчетов. С этой целью предлагается проведение серии комплексных самолетных экспериментов в районах нефтедобычи (Ханты-Мансийский АО) и в зонах расположения наиболее экологически вредных промышленных предприятий (например, Норильский никелевый комбинат и т.п.) для отработки технологии мониторинга мощности выбросов в атмосферу от типовых стационарных источников и оценки их влияния на окружающую среду. Самолет-лаборатория позволит получить репрезентативные данные по концентрациям и переносу загрязнений на различных высотах (CO, NO, NO₂, сажа и др.) в атмосфере, в том числе парниковых газов (CH₄, CO₂, N₂O, хлорфторуглероды) для валидации модельных расчетов и оптимизации сети наземных и космических наблюдений. Такая же технология валидационных самолетных работ применима для оптимизации построения систем мониторинга состояния фоновых региональных территорий (район озера Байкал, биосферные заповедники, государственные заказники и т.п.).

Мониторинг естественных и антропогенных приземных эмиссий и стоков парниковых газов на территории РФ (метан, двуокись углерода, закись азота, ХФУ) на основе измерений их концентраций в тропосфере и моделирования

Определение мощности источников и стоков парниковых газов и относительной роли естественных и антропогенных факторов, определяющих этот баланс, является на сегодняшний день актуальной научной и практической задачей. В настоящее время с этой целью в США, Японии, Европе разрабатываются специальные спутниковые проекты, направленные исключительно на измерение парниковых газов и оценки глобальных источников и стоков этих парниковых газов на основе обратного моделирования. Одним из таких примеров по оценке глобальных эмиссий диоксида углерода на основе данных наблюдений наземных станций и спутниковых данных является японский проект GOSAT. В практическом плане, с учетом требований Киотского протокола, весьма актуальной задачей является определение эмиссий парниковых газов от антропогенных источников в региональных масштабах. В этом случае, наряду с систематическими наземными наблюдениями, необходимы самолетные измерения концентраций парниковых газов по оптимально подобранным маршрутам (целевые наблюдения). На борту самолета – лаборатории ЯК-42Д «Росгидромет» установлен комплекс высокоточной аппаратуры для измерения фоновых концентраций парниковых газов на различных высотных уровнях в

тропосфере (CO_2 , CH_4 , N_2O , ХФУ). Предлагается проведение серии самолетных наблюдений сезонной изменчивости концентрации парниковых газов над заданными регионами территории РФ с целью использования этих данных для расчетов региональных эмиссий и стоков парниковых газов. На основе этих же оценок, с учетом требований по ежегодному сокращению выбросов парниковых газов в атмосферу, может быть реализован мониторинг долговременных трендов изменения мощности региональных выбросов метана, хлорфторуглеродов и других парниковых газов в атмосферу антропогенного происхождения.

Исследование вариаций изотопного состава водяного пара, углекислого газа и метана в тропосфере

Эта задача актуальна при проведении исследований по двум проблемам.

➤ Идентификации источников водяного пара в атмосферном воздухе при изучении гидрологического цикла в системе атмосфера-океан. Величина отношения изотопов $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$ для определённой воздушной массы изменяется в процессах фазовых превращений и является трассером «силы гидрологического цикла». Распределение величины отношения $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$ в атмосфере отражает предысторию формирования воздушных масс и характеризует перенос скрытого тепла из тропического пояса к средним и высоким широтам. Самолетный мониторинг изотопного состава атмосферного водяного пара в воздушных массах может уточнить процессы фазовых превращений воды в ходе гидрологического цикла и уточнить параметры моделей общей циркуляции атмосферы, учитывающих разделение изотопов воды.

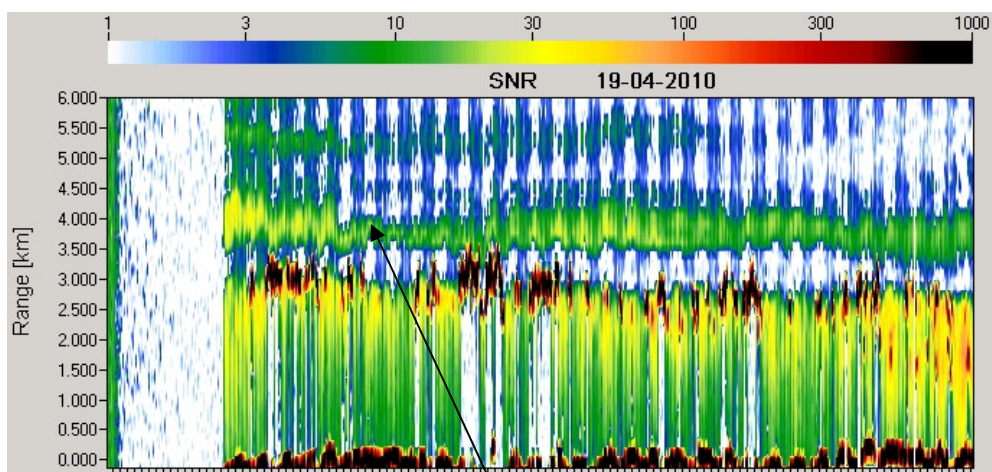
➤ Оценка относительной доли антропогенной и природной составляющей в содержании углекислого газа и метана в атмосфере. Для выявления первоисточников поступающего в атмосферу CO_2 необходимо производить измерения отношения изотопов $\text{C}^{13}/\text{C}^{12}$. Например, если поступающий в атмосферу CO_2 образуется из сжигаемого топлива, соотношение $\text{C}^{13}/\text{C}^{12}$ снижается. Важно также определение отношения $\text{C}^{14}/\text{C}^{12}$, увеличение которого является индикатором проведения ядерных испытаний. Происхождение же метана можно определить по соотношению в нём изотопов углерода — обычного, ^{12}C , и утяжелённого, ^{13}C . Естественное происхождение метана, который образуется в биогенных процессах, выбросах грязевых вулканов, характеризуется повышенным содержанием легкого изотопа ^{12}C .



На борту самолета лаборатории ЯК-42Д имеется высокочувствительная газоаналитическая аппаратура для измерения изотопов CO_2 , H_2O , CH_4 , позволяющая проводить измерения вертикальных профилей отношения концентраций этих изотопов для изучения вышеназванных процессов.

Мониторинг распространения продуктов природных и техногенных катастроф

Загрязнение атмосферы опасными веществами также может быть результатом природных и техногенных катастроф. К числу таких опасных примесей относятся, в частности, вулканический пепел, радионуклиды при авариях на АЭС, продукты горения лесных пожаров, токсичные вещества, попадающие в атмосферу при взрывах, утечках и других технологических авариях. Например, выбрасываемые в атмосферу огромные массы вулканического пепла создают реальную угрозу авиасообщению, а двуокись серы, попадая в стратосферу и превращаясь в сульфатный аэрозоль, оказывает влияние на климат. Самолетные наблюдения распространения вулканического пепла являются важной составной частью системы мониторинга таких природных явлений. На Рис.6 а,б,в. показан пример самолётных наблюдений вулканического пепла, проведенных немецким летным центром космического агентства через два дня после извержения вулкана в Исландии в апреле 2010 года. В результате этих оперативных полетов исследовательского самолета «Falcon» немецкие ученые получили исчерпывающую информацию о концентрации, размере и составе частиц пепла на различных эшелонах полетов гражданской авиации. На этой основе был сделан обоснованный вывод о возможности возобновления авиасообщений. Высокая оперативность и результативность мероприятий, проведенных в период извержений вулкана с использованием подготовленного к полетам самолёта-лаборатории, была возможна благодаря наработанным программам самолетного зондирования и применению оперативного моделирования переноса воздушных масс с использованием реальных и прогностических карт метеополей. Поскольку на борту российского самолета лаборатории ЯК-42Д «Росгидромет» также установлена аппаратура для измерения микрофизических, оптических характеристик атмосферного аэрозоля, предлагается разработать соответствующие сценарии и программы самолетных работ по мониторингу вулканических загрязнений над территорией РФ (рисунок 8). Отработка таких программ по мониторингу вулканической пыли, может проводиться в рамках исследовательских полетов в районе Камчатки и Дальнего Востока.



а) Лидарные измерения шлейфа вулканического пепла (DLR)



б) Шлейф вулканического пепла на значительном удалении от Исландии



в)

Рисунок 8 а,б,в Измерения вулканического шлейфа пепла с самолета DLR «Falcon»

Аналогично предлагается использовать самолётные измерения концентраций радионуклидов в атмосфере для мониторинга фоновой обстановки или их

распространения в результате возможных аварий на АЭС, проведения подземных ядерных взрывов. Росгидромет планирует проведение самолетных работ по мониторингу радиоактивного загрязнения местности на территории РФ загрязненных вследствие аварии на Чернобыльской АЭС (Брянская, Тульская, Калужская, Орловская области и сопоставление с данными, полученными в предшествующие годы. Будут также проведены самолетные работы по проверке состояния радиоактивного загрязнения поймы реки Енисей, загрязнений вследствие многолетних сбросов технологических вод промышленных реакторов Горно-химического комбината. Запланировано проведение инспекционных работ по проверке объемной активности радионуклидов в шлейфах выбросов из труб двух АЭС с реакторами разных типов (Ленинградская АЭС, Калининская АЭС) и сопоставление полученных данных измерений с расчетными.

Электрические параметры атмосферы, такие как электрическая проводимость атмосферы и напряженность электрического поля могут быть подвержены существенному влиянию радиоактивного и аэрозольного загрязнений вследствие различных природных и антропогенных катастроф. Одним из ярких проявлений этого влияния является Чернобыльская авария, приведшая к сильному изменению ионизационного состояния атмосферы как на территориях близких к Чернобыльской атомной электростанции, так и в достаточно удаленных европейских странах. В последнем случае эти изменения были обусловлены переносом долгоживущих радиоактивных веществ в страны Западной и Северной Европы. Такое воздействие приводит к значительному увеличению электрической проводимости и уменьшению напряженности электрического поля в области изменения электрической проводимости.

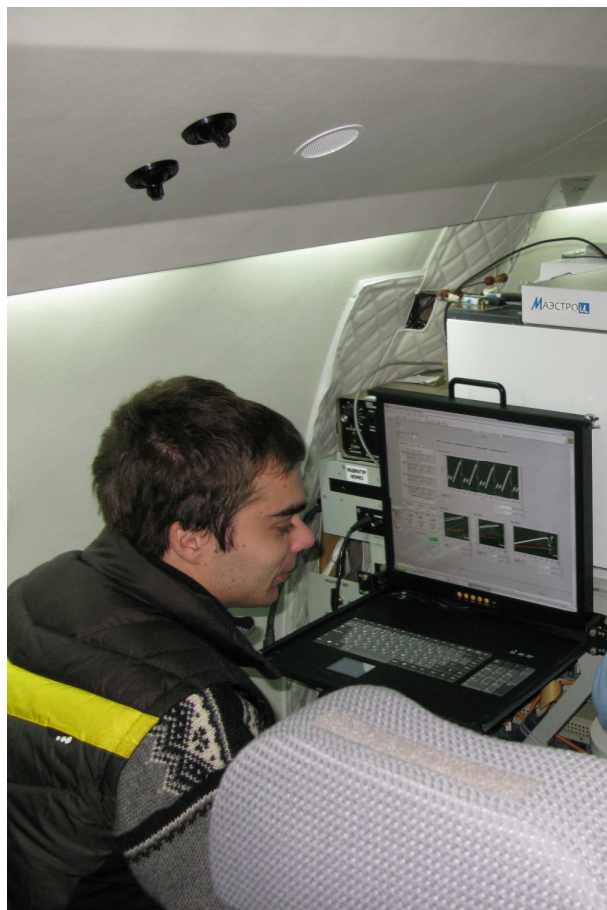
В случае воздействия на атмосферу аэрозольными загрязнениями ситуация противоположная: уменьшается электрическая проводимость и возрастает напряженность электрического поля. Аэрозольные облака большой протяженности по горизонтали и вертикали могут сами генерировать электрические поля вследствие взаимодействия частиц и захвата атмосферных ионов, для которых генерируются как вертикальная, так и горизонтальная составляющие напряженности электрического поля.

Если рассматривать влияние радиоактивных веществ и аэрозольных частиц на электричество облаков, то в первом случае при воздействии на облака происходит уменьшение электрических полей, а в случае загрязнения аэрозолями их увеличение. Эти процессы могут контролироваться самолетными измерениями.

Данные самолётных измерений в случае извержения вулканов и в случае аварий на АЭС позволят получать оценки мощности источника выброса, высоту выброса, эволюцию шлейфа на различных удалениях от источника выброса, которые, как правило, не известны.

К числу наиболее частых природных катастроф относятся крупномасштабные, продолжительные лесные пожары. Лесные пожары представляют экологическую проблему, приносящую огромный экономический ущерб в условиях развитой промышленной инфраструктуры, и являются природным фактором, оказывающим влияние на эволюцию и динамику экосистем. Связанные с лесными пожарами выбросы аэрозоля и химических продуктов сгорания в атмосферу, могут оказывать существенное влияние на локальный и региональный уровни загрязнения атмосферы, изменять микрофизические и оптические характеристики облачного покрова, а, следовательно, воздействовать на процессы осадкообразования и в результате на погоду целого региона.

Для оценки влияния лесных пожаров на локальную, региональную и глобальную экодинамику необходимо применение комплексных измерительных средств, таких как самолёт-лаборатория, а также численного моделирования многофазных процессов в атмосфере с учетом динамики и химических реакций атмосферного аэрозоля. Важным элементом в этой проблеме является изучение эффекта пиро-конвекции, заключающегося в быстром переносе тропосферного воздуха в стратосферу за счёт кумулятивного сочетания эффекта сильных лесных пожаров и мощной конвекции. Таким образом, продукты горения, аэрозоли и тропосферные воздушные массы попадают непосредственно в стратосферу, где время жизни некоторых газовых составляющих и аэрозолей может быть достаточно велико для влияния на озоновый слой в стратосфере. Спутниковые наблюдения свидетельствуют о частых эпизодах переноса примесей за счёт пиро-конвекции, однако механизм данного феномена слабо изучен главным образом из-за нехватки точных данных измерений. Для всестороннего исследования механизма пиро-конвекции, а также оценки его влияния на состав тропосферы и стратосферы необходима скоординированная программа самолетных, спутниковых и наземных дистанционных (лидарных, радиолокационных, оптических) наблюдений. Предлагается проведение самолетных исследований по оценке влияния продуктов сгорания крупномасштабных пожаров на качество атмосферного воздуха в удаленных районах и оценке возможных региональных изменений погоды.



Валидация химико-климатических и транспортно-химических моделей атмосферы

В современных климатических моделях общей циркуляции атмосферы учитываются основные физические и химические процессы в атмосфере, определяющие состав атмосферы и природу изменений климата Земли. Несмотря на постоянное совершенствование моделей, существенные разногласия между данными наблюдений, модельными расчетами и даже различными моделями по-прежнему существуют. Так по данным 4-го Оценочного доклада МГЭИК оценки повышения среднеглобальной температуры при удвоении концентрации CO_2 лежат в интервале $2.0\text{--}4.5^\circ$, что затрудняет выработку адекватных мер по противодействию глобальным изменениям климата Земли. В частности, это связано с несовершенством радиационных блоков моделей, также показывающих рассогласование в расчётах радиационного баланса, сопоставимое с антропогенным воздействием.

Транспортно-химические модели также характеризуются ошибками, вызванными неточностью метеорологических полей, параметризацией физических процессов и т.д. Поэтому, для валидации и коррекции блоков моделей, в частности, радиационных схем, схем параметризации турбулентного перемешивания в пограничном слое атмосферы и в тропосфере, необходимы более представительные данные самолетных измерений, являющиеся необходимым дополнением к спутниковым и наземным наблюдениям. Самолёт-лаборатория ЯК-42Д «Росгидромет» обладает необходимым набором аппаратуры для измерения термодинамических параметров атмосферы, радиационных потоков, параметров турбулентности, пространственно-временных флуктуаций концентраций консервативных примесей в атмосфере, являющихся трассерами движений различных масштабов и т.д. Предлагается использовать самолет-лабораторию для проведения работ по уточнению вышеназванных параметризаций.

Еще одним из важных динамических процессов средней атмосферы, параметризации которых в современных моделях циркуляции атмосферы требуют существенного улучшения, являются гравитационные волны. Практически во всех самолетных программах предусматривается проведение измерений таких параметров динамики тропосферы как, скорость ветра, температура с высоким разрешением по времени. Полученные ряды наблюдений предполагается затем проанализировать с целью определения спектральных характеристик гравитационных волн (ГВ) и, в частности — инерционно - гравитационных волн.

Известно, что возникновение ГВ может быть обусловлено как орографическими неоднородностями поверхности, так и процессами, связанными с образованием облачности, прохождением фронтов, конвекцией, тропическими циклонами и др. Распространяясь преимущественно вертикально, ГВ переносят в верхние слои атмосферы импульс и энергию, влияя на циркуляцию стратосферы и тропосферы. Из-за уменьшения плотности с ростом высотой амплитуда ГВ растет экспоненциально, при этом разрушение ГВ происходит при достижении критического уровня. Особый интерес представляют самолетные наблюдения за параметрами гравитационных волн в областях струйных течений (с максимальными скоростями зонального ветра), характеризующиеся процессами неустойчивости.

Мониторинг параметров электрического поля Земли и потенциала ионосферы

Электрическое поле является одним из физических полей Земли. Мониторинг приземных параметров электрического поля достаточно сложен из-за влияния местных приземных факторов. Самолетные зондировки существенно упрощают эту задачу. Зондировки до высот 9000-10000 м позволяют оценивать потенциал и верхних слоев атмосферы с приемлемой точностью и могут служить критерием устойчивости электрического климата того или иного района и Земли в целом.

Мониторинг условий тропосферно-стратосферного обмена и оценка его вклада в изменение регионального и глобального климата

Тропосфера оказывает влияние на стратосферу в основном посредством атмосферных волн, распространяющихся вверх. В то же время, существует и обратная связь, которая выражается в том, что характер стратосферной циркуляции оказывает существенное влияние на характер погоды в Северном полушарии. Улучшение понимания механизмов взаимосвязи тропосферы и стратосферы на основе самолетных измерений необходимо для повышения точности и увеличения заблаговременности прогнозов погоды (предикторы экстремальных климатических явлений, сезонная изменчивость, потоки масс через тропопаузу, пиро-конвекция). Преимуществом самолётных наблюдений является возможность одновременных измерений многих компонент. Например, корреляционная зависимость водяного пара (много в тропосфере и мало в стратосфере) и озона (много в стратосфере и мало в тропосфере) позволит судить о процессах массообмена через тропопаузу. Самолет-лаборатория ЯК-42Д «Росгидромет» позволит

проводить исследования процессов массообмена между верхней тропосферой и нижней стратосферой.

Изучение взаимосвязи влажности, аэрозоля и перистых облаков.

Оценка влияния этих факторов на радиационный баланс в атмосфере.

Искусственная модификация климата («геоинжиниринг»)

Актуальность данного направления исследований связана с тем, что в настоящее время аэрозоли являются наиболее неопределенным климатообразующим фактором. Так, по данным 4-го оценочного доклада МГЭИК за 2009 г. разброс оценок характерного воздействия аэрозолей на атмосферный радиационный баланс сопоставим с воздействием парниковых газов.

Поглощение и рассеяние радиации на аэрозолях оказывает заметное влияние на радиационный баланс Арктической атмосферы. Считается, что данный регион наиболее чувствителен к изменениям радиационных потоков вследствие низкого уровня поглощения солнечной энергии в полярных регионах. Самолетные измерения размеров и концентрации аэрозольных частиц и ядер конденсации являются наиболее информативными для оценки значимости радиационных эффектов.

Особую роль в радиационном балансе и дегидратации верхней атмосферы играют перистые облака. Самолётным наблюдениям этих облаков отводится ключевая роль, поскольку они плохо обнаруживаются спутниковыми приборами. Большое значение имеет одновременное измерение влажности и концентрации ледяных частиц для изучения фазовых переходов и формирования перистых облаков. Самолета-лаборатории ЯК-42Д «Росгидромет» позволит проводить исследования радиационного баланса в тропосфере, в том числе исследовать влияние искусственно засеянного сульфатного аэрозоля на перенос радиации в верхней тропосфере и нижней стратосфере при проведении ограниченных экспериментов в высоких широтах Северного полушария.

Изучение влияния авиации на состав верхней тропосферы и нижней стратосферы

Влияние полетов авиации на состав атмосферы и климат проявляется не только в выбросах диоксида углерода, но также и в выбросах других климатообразующих компонент. К ним относятся окислы азота, влияющие на содержание озона и метана, водяной пар, формирующий конденсационные следы, радиационный эффект от которых сравним с влиянием природных перистых облаков (рисунок 9).



Рисунок 9 Самолётные инверсионные следы

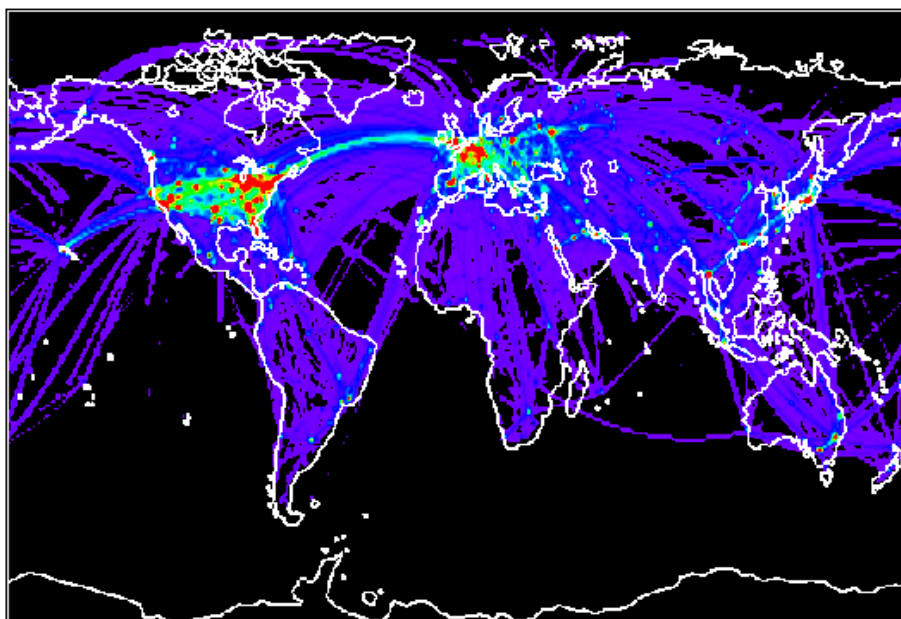


Рисунок 10 Основные схемы маршрутов полетов гражданской авиации

В рамках этой проблемы предлагается измерение самолетных газовых эмиссий и частиц (сажа, сульфатные аэрозоли) вдоль воздушных коридоров с наиболее плотным авиационным трафиком (Северо-Атлантический коридор и другие), в соответствии с основными схемами полетов гражданской авиации (рисунок 10), а также измерения

фоновому составу верхней тропосферы с помощью самолёта-лаборатории ЯК-42Д «Росгидромет». На основе полученных данных систематических самолётных измерений возможны модельные исследования переноса и дисперсии самолётных выбросов, оценка влияния инверсионных следов на радиационный баланс верхней тропосферы и слоя тропопаузы.

Мониторинг термодинамических параметров тропосферы с целью улучшения методов краткосрочного прогноза опасных погодных явлений

На борту самолёта-лаборатории установлена аппаратура для измерения термодинамических параметров (температура, ветер, влажность). Проводить рутинные полёты для улучшения прогноза погоды слишком затратно, но в случае приближения прогнозируемых опасных погодных явлений (ураганы, тропические циклоны, обильные осадки и т.д.) или в рамках комплексных исследований опасных погодных явлений, использование самолёта-лаборатории вполне оправдано. В частности, для улучшения прогноза стихийных бедствий наряду с использованием для этих целей научного оборудования, установленного на борту самолёта ЯК-42Д «Росгидромет», возможно применение метеорологических дропзондов, обеспечивающих оперативную детальную информацию о вертикальной структуре метеорологических параметров в зоне полёта самолёта.

Активные воздействия на атмосферные процессы и мониторинг происходящих изменений

Дефицит пресной воды во многих районах земного шара с недостаточным естественным увлажнением становится ощутимым препятствием для развития, как сельскохозяйственного производства, так и многих других отраслей хозяйства. Для пополнения водных ресурсов во многих странах мира реализуются различные проекты, среди которых все более важное значение приобретают методы активного воздействия (АВ) на атмосферные процессы с целью искусственного увеличения атмосферных осадков. Экспериментальные проекты, выполненные за прошедшие годы в СССР (России), США, Австралии, Израиле, Китае, Испании, Сирии, Иране, Саудовской Аравии и др., убедительно продемонстрировали возможность получения в результате искусственных воздействий на облака ощутимого приращения атмосферных осадков, которое может повлиять на продуктивность сельскохозяйственного производства, на

улучшение режима водопользования и на другие отрасли экономики. В результате многолетних исследований и экспериментов научно-исследовательскими институтами Росгидромета были разработаны эффективные методы и технологии искусственного увеличения осадков (ИУО) из различных форм облаков и технические средства, необходимые для их реализации. Использование самолетных технологий активных воздействий на атмосферные процессы позволяет увеличивать осадки на 15-30%, что было убедительно подтверждено оперативными работами на больших площадях в России, Белоруссии, Казахстане, в Центральной Азии, на Кубе, в Монголии, Ирана и Сирии.

К началу 90-х годов, с использованием разработанной в СССР самолетной технологии, ежегодно выполнялись по договорам с агропромышленными комплексами производственные работы по смягчению воздействия засух путем увеличения осадков в зонах дефицита влаги в вегетационный период. При этом в работах участвовало одновременно до 5-6 самолетов-метеолaborаторий и самолетов воздействия, а площади орошения в разных районах страны (юг Западной Сибири, Северный Кавказ, Казахстан, Поволжье, Крым, Якутия и др.) достигали 20-25 млн. га.

В настоящее время, исходя из намеченной Правительством РФ программы повышения производительности агропромышленного комплекса страны, представляется целесообразным и своевременным возобновить на новом организационном и научно-техническом уровнях производственные работы по увеличению осадков самолетными методами. Созданный самолет лаборатория Як-42Д «Росгидромет» обладает широкими возможностями для проведения работ по активным воздействиям на значительных площадях. Приборное и техническое оснащение самолета-лаборатории позволяет на более высоком научном уровне изучить закономерности эволюции микрофизических и термодинамических параметров облаков, происходящей при активных воздействиях. Самолетный мониторинг микрофизических характеристик облаков и термодинамических параметров атмосферы обеспечит эффективный контроль работ по активным воздействиям на облака и осадки.

В наиболее градоопасном регионе Российской Федерации на территории Южного и Северо-Кавказского федеральных округов с 1967 года осуществлялась производственная защита сельскохозяйственных культур от градобитий на площади 2,52 млн. га. Потери от града сокращаются на 80 - 90 %, годовой экономической эффект составлял порядка 2,5 млрд. руб., затраты на защиту с окупаемостью от 5 до 11 раз, в зависимости от градоопасности года и стоимости защищаемых сельскохозяйственных культур. Однако. в

ряде случаев отмечаются пропуски градобитий на защищаемых территориях, связанные с недостаточной изученностью физических процессов образования града и взаимодействия применяемых реагентов с облачной средой.

Общепризнанной является тесная связь градовых процессов с грозовыми. Разрядные явления в конвективных облаках всегда предшествуют процессу градообразования. В настоящее время методы контроля электрических процессов в облаках позволяют отслеживать разрядную деятельность в облаке на ранних стадиях и определять электрическую структуру конкретного исследуемого облака. Использование информации об электрическом состоянии облаков, несомненно, будет способствовать повышению эффективности противоградовых воздействий.

Кроме этого, существует самостоятельная задача разработки методов дистанционного контроля электрической опасности различных видов облачности. Аппаратурный атмосферно-электрический комплекс на самолете ЯК-42 является основой методов валидации и верификации существующих и вновь разрабатываемых дистанционных и прямых методов контроля электрического состояния облачности.

Электрические явления в облаках являются причиной неоднородности воздушных потоков в облаке, которая является, в свою очередь, одним из самых опасных явлений в облаках для самолетов. Исследование этих явлений и их достоверный прогноз невозможны без вышеупомянутого комплекса.

Для дальнейшего развития физических основ и методов активного воздействия на градовые процессы серьезный научный и практический интерес представляют исследования начальных стадий градообразования с помощью ЯК-42Д «Росгидромет». Крайне актуальными являются экспериментальные исследования физических процессов, происходящих во вновь развивающихся (фидерных) конвективных облаках, за счет которых обновляются зрелые градовые облака, до появления и в стадии появления их радиоэха, включая самолетные измерения:

- микрофизических и термодинамических характеристик (спектра и концентрации облачных капель и кристаллов, водности, турбулентности, скорости вертикальных потоков) на уровнях основания, в центральной и верхней частях Cu Cong;
- концентрации искусственного аэрозоля через 1, 3, 5, 10 мин после его внесения с помощью пиропатронов и противоградовых ракет;

- спектр облачных частиц через 1, 3, 5... мин после введения искусственного аэрозоля для оценки эволюции облачных параметров в результате засева;
- координат границ фидерных облаков относительно области радиоэха для оценки механизма обновления градовых облаков во фронтальной части и разрушения в тыловой;
- продолжительность существования фидерных облаков от момента появления до обнаружения первого их радиоэха;
- вид первых частиц, создающих обнаружимое радиоэхо, в развивающихся Cu Cong при естественном развитии и в результате их засева;
- влияние электрического поля зрелого облака на процессы конденсации и другие процессы в фидерных облаков.



Основные летно-технические характеристики самолета-лаборатории ЯК-42Д "РОСГИДРОМЕТ":

- Экипаж – 3 человека
- Бортоператоры – 14 человек
- Максимальная высота полета – 9 100 м
- Дальность полета – 3 700 км
- Диапазон скоростей полета от 350 до 700 км/час
- Максимальный взлетный вес – 57,5 т



Контакты: 141700, г. Долгопрудный, Московская область, ул. Первомайская 3, ФГБУ "Центральная аэрологическая обсерватория".

Борисов Ю.А., Директор ФГБУ "ЦАО"
8 (495) 408 79 45, borisov@cao-rhms.ru

Петров В.В., Начальник летного научно-исследовательского центра ФГБУ "ЦАО"
8 (495) 408 84 55, vpetrov@mail.ru