Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля»

На правах рукописи

Дмитриева Татьяна Михайловна

АТМОСФЕРНЫЕ ВЫБРОСЫ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ И ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ОТ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ В ПРЕДЕЛАХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

25.00.36 – Геоэкология (науки о Земле)

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель
кандидат географических наук,
старший научный сотрудник
Громов Сергей Аркадьевич

Москва – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3
ГЛАВА 1 ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГРАЖДАНСКИХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ И КЛИМАТИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ 10
1.1 Образование и рассеяние авиационных выбросов в атмосфере 15
1.2 Звуковое, вибрационное и другие виды воздействия гражданской авиации и технических средств вспомогательной инфраструктуры 19
1.3 Влияние гражданских воздушных судов на окружающую среду и климатическую систему 26
Выводы по главе 1 48
ГЛАВА 2 МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКЕ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ И ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ОТ ГРАЖДАНСКИХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ 51
Выводы по главе 2 71
ГЛАВА 3 ВОЗДЕЙСТВИЕ ГАЗООБРАЗНЫХ АВИАЦИОННЫХ ВЫБРОСОВ НА АТМОСФЕРУ И ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ 74
3.1 Динамика авиационной работы гражданских воздушных судов 74
3.2 Выбросы парниковых газов в воздушное пространство России 78
3.3 Выбросы загрязняющих веществ в воздушное пространство России. 84
Выводы по главе 3 95
ГЛАВА 4 АНАЛИЗ СОВОКУПНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ГРАЖДАНСКИХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ И КЛИМАТ 97
Выводы по главе 4 105
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 107
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ 113
ПРИЛОЖЕНИЕ А Расчетные данные 131

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Осуществление перехода к устойчивому развитию выявило важность неотложного решения экологических проблем во всех сферах деятельности, включая транспортный сектор, воздействие которого на окружающую среду является одним из основных (Ягодин, Тарасова, 2001; Николайкин и др., 2005; Key GHG Data, 2005; Николайкин и др., 2004; Поповичева и др, 1998 и др.). Между тем создание, совершенствование и ввод в эксплуатацию различных типов самолетов, вертолетов и летательных аппаратов аэрокосмического назначения, а также все более интенсивное их использование в воздушном пространстве Земли сопровождается усилением антропогенной нагрузки на атмосферу и климат. Следствием этого является поступление в атмосферный воздух парниковых газов и загрязняющих веществ, фотохимический смог и выпадение кислых осадков, повышенная акустическая нагрузка в зоне аэропортов, разрушение озонового слоя и, наконец, изменение климата. Изменение климата проявляется в увеличении частоты опасных гидрометеорологических явлений (Второй оценочный доклад, 2014; ICAO, 2010; Израэль и др., 2003; IPCC, 1999 и др.). В конце 20 века перевозки воздушным транспортом в мире ежегодно увеличивались на 5%, и на 5% - выбросы в атмосферу продуктов сгорания авиатоплива. Во второй четверти 21 века ожидается ежегодный рост интенсивности полетов гражданской авиации на 1 – 3%, а масса сожженного топлива вырастет с 270 Мт в 1990 г. до 770 Мт к 2050 году. В свою очередь, к 2050 году выбросы в атмосферу от воздушных судов почти удвоятся по сравнению уровнем 2015 г. (Израэль и др., 2007; IPCC, 1999 и др.).

В условиях значительной протяженности Российской Федерации (около 10 тыс. км в широтном направлении и более 4 тыс. км в меридиональном) особенно велика значимость эффективного транспортного сообщения. Со второй половины 1990-х годов вклад транспорта в суммарный выброс загрязняющих веществ с территории страны составил примерно 40%, из которых значительная часть приходилась на воздушный транспорт (Большедворская, 2000; Козлов и др., 2000,

Государственный доклад, 2005 и др.), что обусловлено высокой его востребованностью для оперативной доставки грузов и пассажиров на большие расстояния. В труднодоступных и отдаленных районах, составляющих примерно две трети территории России (Юрий Антонов. Дороги жизни. «Аргументы Недели» № 5(496) от 11.02.16 доступ по http://argumenti.ru/economics/n525/434348), воздушный транспорт является практически единственным средством круглогодичного сообщения (Тархов, 2015; Неретин, 2017).

Не удивительно, что с 2000 по 2016 гг. перевозка грузов во внутреннем воздушном сообщении Российской Федерации возросла на 164% (с 2,5 до 6,6 млрд. т-км), а пассажиров – на 296% (с 23 до 91 млн. чел) соответственно (Российский статистический ежегодник, 2017). Значительная протяженность воздушных маршрутов в пределах территории России и увеличившаяся интенсивность движения по ним, сопровождаются ростом авиационных выбросов, следствием которого является усиление нагрузки на атмосферу и климат, хозяйственные и природные системы вблизи аэропортов, пассажиров и обслуживающий персонал, а также жителей близлежащих населенных пунктов.

Масса мелкодисперсных и газообразных веществ, выделяющихся из двигателей летательных аппаратов, по абсолютной величине в 40 – 50 раз меньше, чем выбросы от других антропогенных источников (Поповичева и др., 1998). Однако авиационные выбросы происходят не только в планетарном пограничном слое атмосферного воздуха, но и в верхних слоях тропосферы, где участвуют в формировании глобального фона загрязнения атмосферы. Поступление же в атмосферу помимо загрязняющих веществ еще и парниковых газов усиливает негативное воздействие на климат (Израэль и др., 2003; ICAO, 2010; Дмитриева и Грабар, 2017; Кароль, 2000 и др.). Комплексный эффект, производимый на атмосферу и климат авиационными выбросами, исследован не достаточно. Следовательно, разработка научных основ рационального использования и охраны воздушных ресурсов, входящие в область исследований по специальности «Геоэкология (науки о Земле)», имеют высокую актуальность применительно к деятельности авиатранспорта, воздействие которой на атмосферу и климат изучено

в ходе выполнения настоящей диссертационной работы. Следует пояснить, что под воздействием на климат в данной работе подразумеваются эффекты, вызванные совокупным выбросом парниковых газов и ряда газообразных загрязняющих веществ, оказывающих косвенное воздействие на климат.

Цель диссертационной работы – исследовать состав, массу и характер локализации атмосферных выбросов российских гражданских воздушных судов в пределах Российской Федерации и проанализировать их воздействие на окружающую среду и климат. Для достижения цели были сформулированы и **успешно решены следующие научные и практические задачи**:

1. Систематизировать данные о составе и характере влияния на окружающую среду и климат выбросов гражданскими воздушными судами приоритетных парниковых газов и загрязняющих веществ, оказывающих косвенное воздействие на климат;

2. Разработать метод количественной оценки выбросов этих веществ в атмосферу в зависимости от технических характеристик гражданских воздушных судов, эксплуатируемых в России, и выполняемой ими авиационной работы;

3. Выполнить расчет суммарных годовых выбросов приоритетных парниковых газов и загрязняющих веществ, оказывающих косвенное воздействие на климат, от российского гражданского авиапарка в пределах территории Российской Федерации в 2000 – 2015 годах;

4. Проанализировать воздействие авиационных выбросов на окружающую среду и климат.

Научная новизна выполненных исследований состоит в том, что:

- Из состава авиационных выбросов выделены приоритетные газообразные вещества, оказывающие прямое и косвенное влияние на окружающую среду и климат, как в точке выброса, так и повсеместно за счет интенсивного перемешивания и дальнего переноса продуктов выбросов в атмосфере.

- Определены последствия воздействия авиавыбросов на планетарный пограничный слой и верхнюю тропосферу.

• Определен объем выбросов в атмосферу CO_2, CH_4, N_2O, C_nH_m, CO, NO_x и SO_2 российской гражданской авиацией в период с 2000 по 2015 гг., когда налет российских гражданских самолетов увеличился на 57%, а количество взлетно-посадочных циклов – на 9%.

• За первые шестнадцать лет 21 в. на территории Российской Федерации выявлено снижение негативной нагрузки российского авиапарка на планетарный пограничный слой, где расположены основные природные системы и населенные пункты.

• Выявлено соотношение наведенного тепличного и охлаждающего эффектов от выбросов гражданских воздушных судов и степень их влияния на климат.

• Сделаны выводы о степени влияния авиационной работы, выполняемой российским гражданским авиапарком, на экологическое состояние нижнего и верхнего слоев тропосферы над территорией Российской Федерации и на климат.

Все перечисленные работы в Российской Федерации осуществлены впервые.

Теоретическая и практическая значимость работы обусловлена необходимостью получения достоверных данных о массе и пространственном распределении авиационных выбросов для оценки их влияния на атмосферу и климат. Полученные автором расчетные значения выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов также могут быть использованы при анализе деятельности гражданского авиапарка России и для разработки мер по снижению его воздействия на окружающую среду и климат. Результаты диссертационной работы используются для верификации расчетов, включаемых в национальные кадастры антропогенных выбросов и абсорбции парниковых газов, представляемые в органы Рамочной конвенции ООН об изменении климата (Российская Федерация, 2017).

Методология исследования включает теоретические методы, расчетные модели и процедуры обобщения статистических данных, в том числе:

• синтез информации о характере воздействия на окружающую среду и климат выбросов парниковых газов и загрязняющих веществ от гражданских воздушных судов;

• процедуру поиска и обобщения информации о гражданских воздушных судах, находившихся в эксплуатации в России с 2000 по 2015 гг., сведений о количестве и параметрах установленных авиадвигателей, используемом авиационном топливе, компонентном составе и интенсивности выбросов в атмосферу на разных режимах авиационной работы;

• разработку алгоритма расчета газообразных выбросов в атмосферу в зависимости от технических данных гражданских самолетов и выполненной ими работы;

• анализ воздействия на окружающую среду и климат в пределах территории Российской Федерации приоритетных парниковых газов и загрязняющих веществ по данным расчетов ежегодных выбросов в атмосферу воздушными судами российского гражданского авиапарка, выполненных с использованием разработанного алгоритма.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный алгоритм расчета авиационных выбросов парниковых газов и загрязняющих веществ, оказывающих косвенное воздействие на климат, позволяет оценить их суммарные годовые выбросы в атмосферу в пределах территории России и осуществлять мониторинг их влияния на окружающую среду и климат.

2. Выбрасываемые гражданскими воздушными судами парниковые газы и загрязняющие вещества оказывают неравнозначное воздействие на верхнюю тропосферу и планетарный пограничный слой. В пределах территории Российской Федерации за первые 16 лет 21 в. негативная нагрузка на планетарный пограничный слой, где расположены основные природные системы и населенные пункты, в части выбросов парниковых газов уменьшилась на 11%(CO_2) – 59% (CH_4), а по выбросам приоритетных загрязняющих веществ (кроме NO_x) – снизилась на 7% (CO) – 48% (C_nH_m,). Воздействие на верхнюю тропосферу парниковых газов увеличилось на 50% (CH_4) – 79% (N2O), а приоритетных загрязняющих веществ – на 5% (C_nH_m,) – 84% (NO_x).

3. Суммарный годовой эквивалентный выброс парниковых газов и газообразных загрязняющих веществ, оказывающих косвенное воздействие на климат, в 2015 г. был на 46% выше, чем в 2000 году. Наведенный тепличный эффект от выбросов гражданских воздушных судов в 20 раз сильнее создаваемого ими охлаждающего действия.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы были представлены на всероссийских научных конференциях «Актуальные проблемы экологии и природопользования» (Москва, 2009) и «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития» (Москва, 2017); конференции молодых ученых, посвященной 100-летнему юбилею академика Е.К. Федорова (Москва, 2009); на конференциях «175 лет Гидрометслужбе России – научные проблемы и пути их решения» (Москва, 2009) и «Гражданская авиация и глобальное изменение климата» (в рамках Транспортной недели 2011, Москва, 2011); на семинаре Казанского федерального университета (Казань, 2018), а также на заседаниях Ученого совета и научных семинарах ФГБУ «ИГКЭ».

Личный вклад. Автором диссертации обобщены данные об эксплуатации гражданских воздушных судов за первые шестнадцать лет 21 века. Разработан алгоритм оценки совокупного воздействия газообразных авиационных выбросов на окружающую среду и климат. Выполнены расчеты и проанализировано влияние парниковых газов и газообразных загрязняющих веществ, оказывающих косвенное воздействие на климат, от более 85 типов и модификаций гражданских самолетов, эксплуатируемых в России.

Степень достоверности результатов проведенного исследования. Достоверность полученных результатов подтверждается актуальным статистическим материалом, корректным применением методов обработки данных, а также корректным выполнением расчетов величин выбросов в соответствии с разработанным алгоритмом. Оценка достоверности расчетных величин выбросов приведена в диссертационной работе.

Степень разработанности темы исследования расширяет имеющиеся представления о массе, пространственном распределении и характере воздействия

авиационных выбросов на атмосферу и климат. Доступные в настоящее время данные позволяют выявить имеющиеся тенденции распределения выбрасываемых веществ, а разработанный алгоритм расчета авиационных выбросов парниковых газов и загрязняющих веществ, оказывающих косвенное воздействие на климат, позволяет проводить дальнейшую оценку авиационных выбросов в пределах территории России и осуществлять долгосрочный мониторинг их влияния на окружающую среду и климат.

Результаты диссертационной работы используются в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля» (г. Москва) для верификации расчетов, включаемых в национальные кадастры антропогенных выбросов и абсорбции парниковых газов, представляемые в органы Рамочной конвенции ООН об изменении климата

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных журналах из списка изданий, рекомендуемых ВАК для публикации результатов кандидатских диссертаций.

Структура и объем. Общий объем диссертационной работы 142 стр. Она состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложений. При написании диссертации было использовано 163 литературных источника, из которых 64 источника – на иностранных языках.

ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГРАЖДАНСКИХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ И КЛИМАТИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ

В конце 20 – начале 21 вв. стало очевидно, что последствиями антропогенной деятельности могут быть не только локальные, но и глобальные изменения окружающей среды и климата, которые проставляют собой угрозу не только благополучию, но и, в конечном итоге, существованию человеческого общества. Рост концентраций загрязняющих веществ в воздухе влечет за собой разрушение озонового слоя, загрязнение атмосферы, гидросферы и литосферы. Кроме того, происходит образование фотохимического смога, разрушающего объекты антропогенной инфраструктуры. Рост атмосферных концентраций усиливающих парниковый эффект газов антропогенного происхождения – диоксида углерода (CO_2), метана (CH_4) и оксида диазота (N_2O) – индуцирует последовательные изменения оптических свойств атмосферы в инфракрасной области, затем радиационного баланса и, наконец, глобальные по проявлениям трансформации климата, которые проявляются в увеличении частоты опасных метеорологических и гидрометеорологических явлений, подъеме уровня океана, деградации криосферы. Усилившаяся нагрузка на климатическую систему и изменения в химическом составе атмосферы приводят к перестройке естественных экосистем, угрожают биологическому разнообразию и здоровью населения Земли. Кроме того, они также могут сопровождаться серьезными негативными последствиями в социальной сфере и экономике (МГЭИК, 2014; Второй оценочный доклад, 2014; МГЭИК, 2007; Израэль др., 2003; Кароль, 2000; Кобак и др., 2002; Гладильщикова и др., 2019; и др.).

С развитием в Российской Федерации гражданской авиации в 20-х годах 20 века начало увеличиваться воздействие на атмосферу и климатическую систему. Первоначально при разработке авиационных двигателей учитывались такие показатели как безопасность, скорость и дальность полета, комфорт, регулярность полетов и шум в зоне аэропорта (Николайкин др., 2004; Поповичева и др., 1998;

Яновский и др., 2004). Значительно меньше внимания уделялось воздействию на окружающую среду и климат. Интенсивная эксплуатация самолетов, вертолетов и летательных аппаратов аэрокосмического назначения привели к ухудшению состояния окружающей среды и климата. Вследствие интенсивного роста, выбросы продуктов сгорания авиатоплива, загрязнение горюче-смазочными материалами, а также шумовая и электро-магнитная нагрузки превратились в значимые факторы воздействия на хозяйственные и природные системы в зоне географической локализации аэропортов крупных городов и транспортно-пересадочных узлов. И это несмотря на то, что количество загрязняющих веществ, выделяющихся из двигателей летательных аппаратов, по абсолютной величине в 40 – 50 раз меньше, чем от других источников транспорта, энергетики, промышленности и сельского хозяйства (Поповичева и др., 1998; IPCC, 1999; ICAO, 2010; Дмитриева и Грабар, 2017 и др.).

Самолет – единственный вид техники, эксплуатирующийся на больших высотах, где формируются атмосферные процессы и существуют мощные ветровые течения. Поэтому особенностью авиационных загрязнений является их распространение на большие расстояния благодаря атмосферному переносу. На рисунке 1, составленном автором по данным работ (Кароль, 1995; Baughcum, 1997; IPCC, 1999; ICAO, 2010; и др.), показаны высоты коридоров крейсерских полетов сверхзвуковых и дозвуковых воздушных судов в атмосфере средних географических широт, к которым относится большая часть территории Российской Федерации.

В истории мировой гражданской авиации было два пассажирских сверхзвуковых самолёта, которые выполняли регулярные коммерческие рейсы в нижней стратосфере (рисунок 1). В СССР это был самолёт Ту-144, который находился в эксплуатации с 1975 по 1978 гг., а за рубежом – англо-французский «Конкорд», совершавший трансатлантические рейсы с 1976 по 2003 гг. (Большая энциклопедия транспорта, 1995). Поскольку эксплуатация сверхзвуковых гражданских самолетов уже прекращена, а современный российский гражданский

авиапарк представлен только дозвуковыми самолетами, влияние сверхзвуковых воздушных судов в настоящей диссертационной работе не рассматривается.

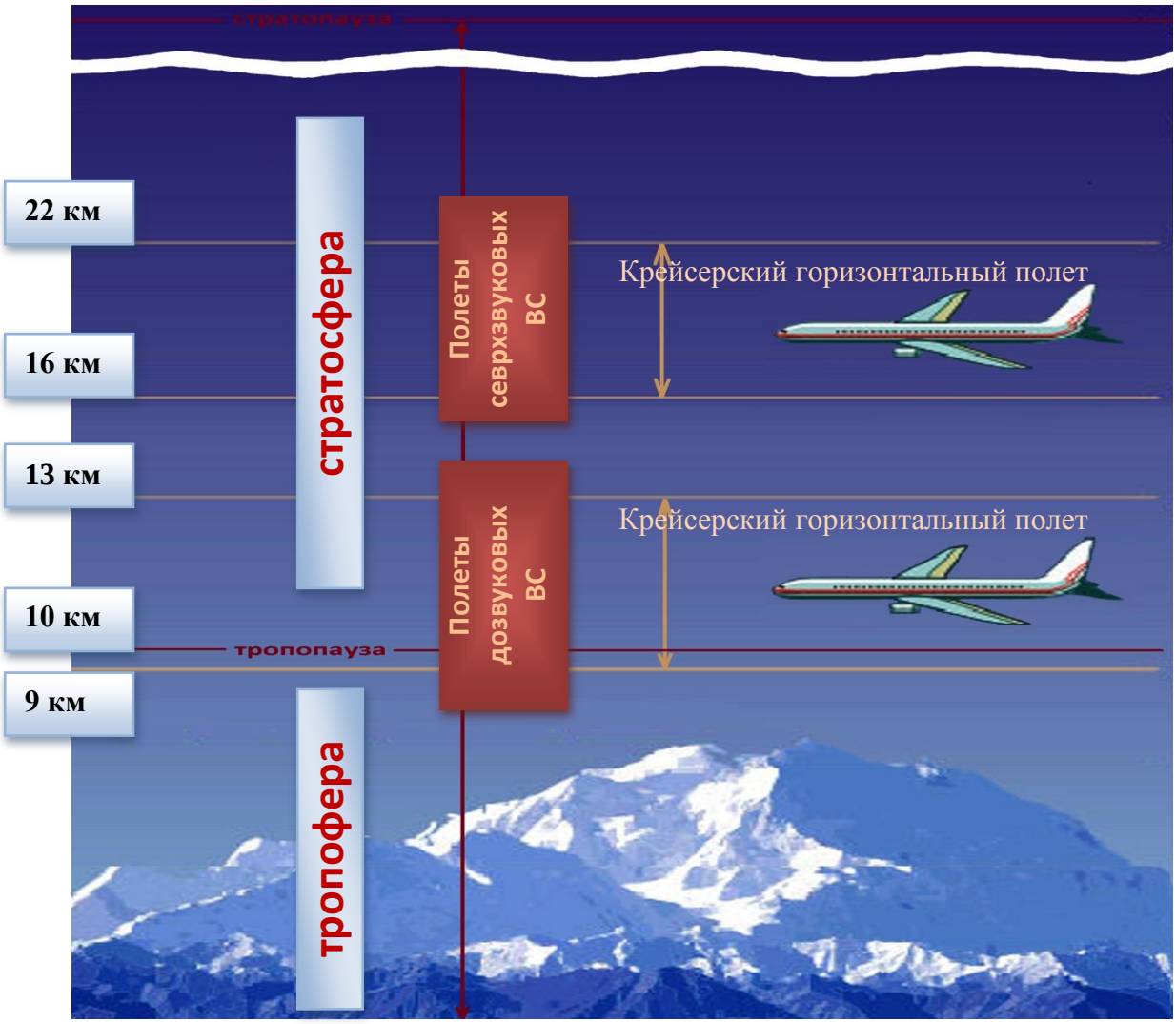

Рисунок 1 – Коридоры полетов сверхзвуковых и дозвуковых воздушных судов в средних географических широтах (составлен автором по данным Кароль, 1996; Baughcum, 1997; IPCC, 1999, ICAO, 2010; и др.)

Во время крейсерского полета дозвуковых самолетов над территорией России авиационные выбросы происходят в воздушном коридоре на высоте 9 – 13 км от поверхности Земли. В связи с сезонным изменением высоты тропопаузы в средних широтах, в летний период этому слою соответствует верхняя тропосфера, а в зимний – тропопауза (рисунок 1). И если при изучении воздействия летательных аппаратов на атмосферу и климатическую систему

первоначально основное внимание уделялось сверхзвуковым[1] самолетам и вызванным ими изменениям радиационного режима стратосферы и озоносферы на высотах 16 – 22 километра, то современные исследования уже направлены на оценку влияния дозвуковых[2] самолетов, основные перелеты которых (крейсерский полет) происходят на высоте тропопаузы (рисунок 1). Именно в этом слое в настоящее время наблюдается высокая интенсивность авиационного движения и, соответственно, накопление продуктов сгорания авиатоплив.

Регулярные маршруты гражданских самолетов в воздушном пространстве Земли, включая полеты, выполняемые над Россией, представлены на рисунке 2, составленном по данным http://globalconnectionsandstuff.weebly.com/index.html. Наибольшая плотность движения самолетов наблюдается в северном полушарии, так как здесь проложены основные воздушные коридоры, которые соединяют страны Европы с Северной Америкой и другими континентами (рисунок 2). Значительно ниже интенсивность движения в южном полушарии, где трассы над Атлантическим океаном, соединяют Европу с Латинской Америкой, и над Тихим океаном, через который осуществляются перелеты в Юго-Восточную Азию (Brasseur et al., 1998; Airtraffic, 2001; Кароль, 2000; ICAO, 2010; и др.).

Из рисунка 2 хорошо видно, насколько плотна маршрутная сетка перелетов над Европейской частью России (ЕЧР) и Западной Сибирью. Несколько ниже интенсивность полетов над центральной и восточной частями Сибири. Но она снова возрастает на юге Сибири и по мере приближения к районам Дальнего Востока. Значительное число авиационных трасс проходит в полярных регионах России, для которых характерны низкая температура и экстремальные погодные и климатические условия (рис. 2). Следует отметить, что по данным Второго оценочного доклада об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, именно северные регионы страны проявляют высокую

[1] Сверхзвуковой самолёт – самолёт, способный совершать полёт со скоростью, превышающей скорость звука в воздухе (полёт с числом Маха M = 1,2 – 5,0).

[2] Дозвуковой самолет – самолет, максимальная скорость которого не превышает скорость звука.

чувствительность к негативным изменениям окружающей среды и климата (Второй оценочный доклад, 2014).

Рисунок 2 – Маршруты полетов гражданской авиации в воздушном пространстве Земли (по http://globalconnectionsandstuff.weebly.com/index.html)

Высокая частота воздушного движения и широкий территориально-географический охват слоя атмосферного воздуха на высоте 9 – 13 км, где проложено большинство маршрутов гражданских воздушных судов (рисунки 1 и 2), неминуемо ведут к росту концентраций продуктов сгорания авиационного топлива и оказывают воздействие на состав атмосферного воздуха (рис. 1). Столь высокая частота движения не может не сказаться на качестве атмосферного воздуха в верхней тропосфере и тропопаузе, тем более что регулярные полеты в этом слое осуществляются круглый год. Учитывая всесезонное поступление загрязняющих веществ и парниковых газов из состава авиационных выбросов и их последующее рассеяние в верхних слоях тропосферы, есть основания предполагать не только увеличение загрязнения воздуха, но также возможное влияние на климат над территорией Российской Федерации, площадь которой составляет более 17% северного полушария.

1.1 Образование и рассеяние авиационных выбросов в атмосфере

Работа авиационных двигателей и вспомогательных силовых установок гражданских воздушных судов сопровождается образованием продуктов сгорания авиационного топлива и горюче-смазочных материалов, которые затем поступают в атмосферу. При рассмотрении выбрасываемых самолетами химических веществ и соединений выделяют три основных стадии их формирования и последующего рассеяния в атмосферном воздухе (Николайкин и др., 2004; Karol, Kiselev, 1999; Karol et al., 1999; Miake-Lye et al., 1993; и др.):

1) выход струи от сопла двигателя (0 – 10 с);

2) турбулентное перемешивание (10 – 100 с);

3) рассеяние струи продуктов сгорания и их перенос на дальние расстояния (от нескольких часов до нескольких суток).

В возмущенной самолетом области атмосферы наблюдается развитие комплекса взаимосвязанных гидродинамических и фотохимических процессов. Сначала струи выбросов из нескольких двигателей самолета и вихревые потоки с концов его крыльев свертываются в единый вихревой след кругового сечения с резкими границами и неоднородным распределением продуктов сгорания. Высокая температура на выходе из сопла понижается до температуры атмосферного воздуха, при которой начинаются реакции между продуктами сгорания и фотохимически активными составляющими воздуха вплоть до рассеяния струи. Вихревой след распадается на отдельные крупномасштабные образования кольцевой формы, которые в итоге смешиваются с невозмущенной атмосферой (Бурико, 2000; Кароль и Озолин, 1995; Karol, Kiselev, 1999). Продукты сгорания и производные их трансформаций распространяются в зонах коридоров полетов и вовлекаются в дальний атмосферный перенос, где происходят их дальнейшие фотохимические и микрофизические превращения (Александров, 1992; Кароль, Озолин 1995; Baughcum, 1997; Brasseur et al., 1998, ICAO Engine Exhaust Emissions DataBank, 2004; ICAO, 2010; и др.). В дальнейшем образовавшиеся вещества и соединения принимают участие в локальных и

глобальных циклах углерода, азота и серы и, наконец, поступают на подстилающую поверхность с осадками и сухими выпадениями.

В идеальных условиях конечными продуктами сгорания авиатоплив должны быть диоксид углерода и пары воды, соотношение между которыми зависит от содержания в топливе углерода и водорода (C/H). Если бы авиатопливо состояло только из углеводородов, химический состав которых схематически можно выразить формулой C_nH_m, то уравнение его термического окисления можно было бы записать как (Николайкина и др., 2006):

$$4\,C_nH_m + (4n + m)O_2 = 4nCO_2 + 2mH_2O$$

На самом деле общий вид молекулы авиационного топлива может быть представлен как $C_nH_mO_xN_yS_z$, и в составе выбросов, образующихся в результате его сжигания в двигателях гражданских воздушных судов, присутствуют другие продукты сгорания, которые составляют не более 9% массы веществ, выбрасываемых авиационным двигателем. Малая их часть (около 0,4%) обусловлена конструктивными особенностями авиадвигателя, которые допускают неполное окисление топлива, сопровождающееся образованием оксида углерода (CO), окислов серы (SO_x), неметановых летучих органических соединений (НМЛОС или C_nH_m), окислов азота (NO_x). Кроме того, в реальных условиях практически невозможно обеспечить необходимое для полного сгорания стехиометрическое соотношение[3] между авиатопливом и окислителем (кислород атмосферного воздуха) на всех режимах работы авиадвигателей. Следует добавить, что соотношение компонентов выхлопной смеси может меняться в зависимости от типа и модификации, условий работы и выработки ресурса авиадвигателя, а также характера и состава топлива (Александров, 1992; Brasseur et al., 1998, Кароль, 2000; ICAO Engine Exhaust Emissions DataBank, 2004; Lee et

[3] Стехиометрическое соотношение - численное соотношение между количествами реагирующих веществ, выражающееся целыми числами. Справедливо для всех газообразных и жидких, а также для подавляющего большинства твёрдых химических соединений.

al., 2009; и др.). Таким образом, лишь CO_2 и H_2O могут иметь относительно постоянные значения удельных выбросов, определяемые исходным количеством атомов водорода и углерода в топливе. В то же время при неполном сгорании авиационного топлива образующиеся продукты его сгорания загрязняют атмосферу, изменение химического состава которой, в конечном счете, приводит к изменению и радиационного баланса.

Учитывая вышесказанное можно сделать вывод, что из всех продуктов, образующихся в результате сгорания авиатоплив и горюче-смазочных материалов и затем поступающих в атмосферу, доля диоксида углерода является наибольшей, что свидетельствует о его значимости для анализа влияния гражданских воздушных судов на окружающую среду и климат. Выбросы остальных химических соединений и веществ зависят от условий горения (температура) и (или) содержания примесей в топливе. В атмосфере соединения серы и азота индуцируют закисление осадков. Вместе с газообразными веществами авиадвигатели также выбрасывают аэрозольные продукты сгорания, негорючие сульфаты $CuSO_4$ и $FeSO_4$, а также зольные элементы и соединения.[4] К аэрозольным продуктам горения относятся летучие частицы H_2SO/H_2O размером в несколько нанометров, частицы сажи, покрытые теми же H_2SO/H_2O, размером в десятки нанометров и ледяные частицы, формирующие конденсационные следы, с размерами до 1-2 мкм в начальный момент. Впоследствии эти частицы укрупняются до 10-20 мкм и формируют перистые облака. Концентрации этих частиц в струе выброса в 10^3-10^7 раз превышают фоновые на высоте 10-12 км.

Величина удельного выброса сульфатных частиц растет при содержании серы в топливе более 1%. Выбросы сажи от содержания серы не зависят. Эрозия двигателей и загрязнение топлив может приводить к выделению мелких (<1 мкм) аэрозолей отдельных металлов в количестве 10^7-10^8 частиц на 1 кг топлива.

---

[4] Зольными элементами и соединениями, входящими в состав авиатоплив, являются кремнезем (SiO_2), глинозем ($A1_2O_3$), оксиды железа (Fe), кальция (Ca), магния (Mg). Минеральные примеси могут содержать тяжелые металлы: кадмий (Cd), свинец (Pb), молибден (Mo), кобальт (Co), бериллий (Be), олово (Sn), медь (Cu), уран (U), цинк (Zn), которые также поступают в окружающую среду и загрязняют ее после сгорания топлива.

Несмотря на малые размеры, эти частицы могут давать существенный вклад в загрязнение атмосферного воздуха. Например, в 1992 г. глобальные выбросы от авиатранспортной деятельности привели к увеличению концентрации сульфатных аэрозолей и сажи в слое 10 – 12 км над зоной 50 – 60° с. ш. в 10^2 – 10^3 раз и в 3 – 30 раз соответственно (Александров, 1992; IPCC, 1999). В свою очередь, данные измерений свидетельствуют о том, что плотность стратосферного аэрозольного слоя увеличивалась в течение последних 15 – 30 лет со скоростью 5% в год, что также отчасти связано с возросшей интенсивностью авиационных перевозок (Волков, 1999).

Загрязняющие вещества, выбрасываемые авиадвигателями, также способствуют загрязнению земной поверхности. Дополнительный вклад в загрязнение дают текущий ремонт и обслуживание гражданских воздушных судов, сопровождающиеся образованием технологических сточных вод в аэропортах, сооружениях технического обслуживания, вспомогательных производствах, постах мойки воздушных судов, зданиях и подсобных сооружениях. В поверхностных сточных водах содержатся нефтепродукты, моющие, дезинфицирующие, антиобледенительные и противогололедные вещества, продукты разрушения материалов шасси самолетов и наземной техники аэродромного обслуживания (Яновский и др., 2004; Асатуров, 2010; Николайкин и др., 2004; Поповичева, 1998; и др.). Несмотря на значимость проблематики наземных загрязнений почв, поверхностных и подземных вод, количественная оценка уровней их поступления в объекты окружающей среды не входила в задачи исследований, выполненных диссертантом, и в настоящей работе не рассматривается.

Гражданские воздушные суда и системы обслуживающей их наземной инфраструктуры также оказывают звуковое, вибрационное, электромагнитное, ионизирующее и некоторые другие негативные экологический воздействия, которые рассмотрены в следующем разделе.

1.2 Звуковое, вибрационное и другие виды воздействия гражданской авиации и технических средств вспомогательной инфраструктуры

Звуковые, вибрационные и другие воздействия гражданской авиации и вспомогательной инфраструктуры аэропортов изучаются с 1970-х годов. По уровню шумовой нагрузки авиация занимает ведущее место среди всех прочих отраслей экономики. К основным категориям лиц, подверженных неблагоприятному влиянию авиационного шума, относятся: население, проживающее вблизи аэропорта и трасс полета, работники и посетители аэропортов и других объектов авиатранспортной инфраструктуры, а также пассажиры. Проживающие в зоне влияния аэропортов, получают суточную дозу шума, в 3 раза превосходящую допустимую величину (Почекаева, 2004; Почекаева, Винокур, 2006, Борьба с шумом, 1985).

Источниками шума, создаваемого современными дозвуковыми самолетами, являются авиадвигатели, вспомогательные силовые установки и обтекаемый потоком воздуха планер (элементы механизации крыла). При наземной работе двигателей воздушных судов (режим «малого газа»), основными источниками шума являются вспомогательные силовые установки. При взлете, наборе высоты и полете на крейсерских высотах превалируют шумы маршевых двигателей, и самый высокий уровень шума самолет производит на высотах крейсерского полета. При заходе воздушных судов на посадку основной вклад вносит шум, связанный с обтеканием планера воздухом (Почекаева, 2004; Почекаева, Винокур, 2006; Квитка, 1989; Шишелова и др. 2004; и др.).

У нефорсированных турбовинтовых двухконтурных двигателей внутренний шум горячей части складывается из шумов камеры сгорания, турбины и выходного канала. Шум реактивной струи вызывается турбулентными пульсациями в зоне ее смешения с атмосферным воздухом. С ростом диаметра струи и температуры газов спектр шумовой нагрузки сдвигается в сторону низких частот, а с увеличением скорости истечения – в сторону высоких частот. Поэтому современным двигателям характерен шум в низкочастотной и средней частях

общего спектра. Спектр шума реактивного двигателя занимает широкую полосу частот от 10 до 20 тыс. герц, но основная его энергия сосредоточена в области 50-10 тыс. герц. Спектр шума лопастных машин реактивных двигателей сосредоточен в области 2000-5000 герц, а воздушной струи – 100 – 400 герц (Борьба с шумом, 1985).

Основными источниками шума на аэродроме являются авиационные двигатели во время запуска и прогревания, а также при взлете-посадке воздушных судов. Средняя продолжительность наземной работы двигателей одного самолета, включая среднее время руления по взлетно-посадочной полосе до взлета и после посадки с момента запуска двигателей до их выключения, составляет для самолетов разных типов от 10 до 18 минут. В этих условиях уровень шума в жилых кварталах (на стороне, обращенной к аэродрому на расстоянии до 2 км) эквивалентен 75-85 дБА, а максимальный – 90-92 дБА (Почекаева, 2004; Почекаева, Винокур, 2006; Борьба с шумом, 1985; и др.).

В целях ограничения звуковой нагрузки, создаваемой воздушными судами, проводится ее нормирование на местности (техническое нормирование) и на территории жилой застройки (гигиеническое нормирование). Техническое нормирование отражает возможности современного самолето- и двигателестроения по достижению минимальных уровней шума в стандартных условиях полета или при взлете и посадке. В целях охраны здоровья населения и окружающей среды при проектировании жилой застройки вблизи аэропортов, допустимые значения уровня авиационного шума установлены нормативными документами. Ограничение (нормирование) его на местности проводится на основании ГОСТ 17228-87 и 17228-2014 (ГОСТ 17228-87, 1987; 17228-2014, 2015). Допустимые уровни авиационного шума на территории жилой застройки в дневное и ночное время суток регламентируются ГОСТ 22283-88 «Шум авиационный. Допустимые уровни шума на территории жилой застройки и методы его измерения» и СН 2.2.4/2.1.8 562 – 96 (ГОСТ 22283-88, 1988; СН 2.2.4/2.1.8 562 – 96, 1996), примеры которых приведены в таблице 1. Значения

максимально допустимых уровней звука, установленные для конкретного типа самолета, являются его технической характеристикой.

Таблица 1 – Максимально допустимые значения уровней звука (по данным ГОСТ 22283-88, 1988)

Время суток, часы	**Максимальный уровень звука LA_{max}, дБА**	**Эквивалентный уровень звука $LA_{экв}$, дБА**
День (с 7.00 до 23.00)	85	65
Ночь (с 23.00 до 7.00)	75	55

Таким образом, гражданский аэропорт является комплексным источником интенсивного непостоянного шума, создаваемого воздушными судами. Следует отметить, что крупные аэропорты России, как правило, располагаются в густонаселенных районах. Соответственно от повышенной шумовой нагрузки, производимой взлетающими и садящимися, а также движущимися по земле самолетами, будет страдать значительное количество жителей. Порядок построения границ, зон ограничения жилой застройки в окрестностях аэропорта регулируется «Рекомендациями по установлению зон ограничения жилой застройки в окрестностях аэропортов гражданской авиации из условий шума» (Рекомендации, 1987). В соответствии с ними установлены характеристики четырех зон («А», «Б», «В» и «Г»), определяющие степень пригодности территорий к различным видам застройки. В зоне «А» уровни авиационного шума соответствуют требованиям санитарных норм и СНиП 11-12-77 «Защита от шума, для территории жилой застройки» (СНиП 11-12-77, 1978). В зоне «Б» уровни соответствуют требованиям ГОСТ 22283-88 «Шум авиационный. Допустимые уровни шума на территории жилой застройки и методы его измерения» (ГОСТ 22283-88, 1988). В зоне «В» шум в дневное время соответствует требованиям ГОСТ 22283-88, а в ночное время – на 5 дБА выше норм, установленных ГОСТ 22283-88. Максимально допустимые уровни на территории жилой застройки в

зоне «Г», которые соответствуют ГОСТ 22283-88 (ГОСТ 22283-88, 1988). В ночное время по ГОСТ 22283-88 и СН 2.2.4/2.1.8.562-96 нормируемые параметры звука на 10 дБА жестче по сравнению с дневным временем суток (ГОСТ 22283-88, 1988; и СН 2.2.4/2.1.8.562-96, 1996). В целях снижения звуковой нагрузки от гражданских воздушных судов предусматриваются следующие мероприятия (Почекаева, 2004):

- ограничение эксплуатации наиболее шумных типов воздушных судов и их замена на менее шумные как отечественного, так и зарубежного производства, удовлетворяющие нормативным требованиям Приложения 16 ИКАО (ИКАО, 2008),
- ограничение или запрещение ночной эксплуатации наиболее шумных типов воздушных судов; составление расписания движения воздушных судов с учетом часового и суточного шумовых балансов территории вблизи аэропорта по маршрутам выхода,
- организация рациональной наземной и летной эксплуатации воздушных судов,
- совершенствование приемов управления воздушным движением, отказ от руления самолетов по аэродрому с включенными двигателями благодаря применению их буксировки на место старта специальными тягачами (метод широко используется во многих крупных аэропортах).

Из представленного анализа мер по ограничению негативного влияния акустической нагрузки следует, что проблема, связанная с повышенным звуковым давлением в районе аэропортов, прилегающих к ним зон жилой застройки, а также других природно-территориальных комплексов хорошо известна и достаточно полно изучена. Разработан комплекс мероприятий, реализация которых позволила несколько снизить звуковую нагрузку в зоне аэропортов и на близлежащей территории, несмотря на рост интенсивности эксплуатации гражданского авиапарка. Тем не менее, задачу ограничения звукового воздействия в аэропортах и на прилегающей к ним территории пока нельзя

считать полностью решенной (Борьба с шумом, 1985; Почекаева, 2004; Почекаева и Винокур, 2006; и др.).

Негативные эффекты, вызываемые **вибрацией,** по своей природе близки к акустическим и характеризуются аналогичными количественными показателями. Источниками вибрации являются воздушные суда, совершающие посадку, а распространяется она в основном по грунту, достигая фундаментов зданий, сооружений и инженерных конструкций, которые разрушаются от вызванных колебаний. Вибрация влияет не только на работников отрасли, но и на пассажиров самолетов. Однако ощутимое действие вибрации носит достаточно ограниченный характер, поскольку распространяется на расстояние 150 ... 200 м от взлетно-посадочной полосы (Состояние и перспективы развития авиационных двигателей, 2001; Асатуров, 2010; Николайкин и др., 2004; и др.). Как и в случае эффектов, вызываемых звуковым воздействием, негативные последствия вибрационной нагрузки достаточно хорошо изучены. Разработаны и предпринимаются специальные меры по ее ограничению в зоне аэропортов. Однако эту проблему также нельзя считать полностью решенной. В то же время надо заметить, что ни акустическая, ни вибрационная нагрузка не способны оказать масштабного влияния на окружающую среду и климат.

Менее распространенными, но достаточно существенными негативными факторами воздействия являются **электромагнитное и ионизирующее излучения**. Источниками электромагнитного излучения являются радиотехнические средства – радиолокационные станции (РЛС), радионавигационные системы и средства радиосвязи, основное назначение которых – обеспечение движения и навигации воздушных судов. Комплекс наземных РЛС включает аэродромные и трассовые обзорные радиолокаторы, трассовые радиолокационные комплексы, радиолокационные станции обзора летного поля, посадочные и метеорологические радиолокаторы. Они излучают электромагнитную энергию в наиболее опасном для человека диапазоне частот (300 МГц ... 300 ГГц). Развитие этого вида техники происходит преимущественно по пути непрерывного увеличения интенсивности излучаемой мощности, которая

в сотни и тысячи раз превышает установленные для человека предельно допустимые уровни (Почекаева, Винокур, 2006; Асатуров, 2010; Николайкин и др., 2004).

Не менее опасным видом физического воздействия является **ионизирующее излучение**, источники которого находятся в системах контроля уровня топлива, приборах со светящимися циферблатами и датчиках обледенения воздушных судов. Ионизирующее излучение используется в установках досмотра багажа в аэропортах, и повсеместно используемых электронно-вычислительных комплексах. Эти приборы требуют системы специальных мер и осторожности не только при обращении, но и при утилизации после завершения срока службы и списания. Правила обращения и меры предосторожности при использовании источников электромагнитного и ионизирующего излучения разработаны для всех объектов гражданской авиации, где они эксплуатируются (Состояние и перспективы развития авиационных двигателей, 2001; Асатуров, 2010; Николайкин и др., 2004; и др.) Следует отметить, что негативные эффекты, связанные с использованием этого оборудования, носят узколокальный характер и, следовательно, их масштабное влияние на окружающую среду и климат малозначимо.

Нельзя не отметить негативное влияние авиации на озоновый слой, который имеет важнейшее значение для сохранения биологических форм жизни на Земле. Озоновый слой (или озоносфера) расположен в стратосфере, от высоты 17 – 18 км на экваторе до примерно 50 км над остальной частью земной поверхности, кроме полюсов (на полюсах озоносфера начинается с высот 7 – 8 км). Наибольшая густота озонового слоя наблюдается в слое стратосферы 22 - 24 км от поверхности Земли (Александров, 1992). Проблема, связанная с воздействием на озоновый слой, также детально изучена. Сохранение озоносферы закреплено рядом международных соглашений – Венской конвенцией по защите озонного слоя Земли (1985), Монреальским протоколом по веществам, разрушающим озоновый слой (1987) и поправками к нему, принятыми Лондонской (1990) и

Копенгагенской (1992) конференциями (по данным http://www.ozoneprogram.ru/ozonovoe_zakonodatelstvo/).

Благодаря этим соглашениям, производство озоноразрушающих веществ и их выбросы в атмосферу существенно сократились (WMO, 2007). Одним из следствий комплекса мер по снижению негативного антропогенного воздействия на озоновый слой является то, что сверхзвуковая гражданская авиация, полетная деятельность которой происходит в стратосфере и, соответственно, сопровождается разрушением озонового слоя (рисунок 1), в настоящее время в гражданском авиапарке Российской Федерации отсутствует. Поэтому специальное изучение влияния российских гражданских воздушных судов на озоновый слой в настоящей работе не рассматривается, как было указано в разделе 1.1.

Выполненный анализ влияния гражданских воздушных судов на природные и хозяйственные системы, окружающую среду и климат показывает, что наиболее изученной является проблематика авиационного шума и вибрации. В достаточной мере также исследованы негативные эффекты, вызываемые электромагнитным и ионизирующим излучением. Общей особенностью перечисленных видов негативного авиационного воздействия является их локализация в пределах зон аэропортов или в непосредственной близости от них, что позволяет говорить об ограниченном характере их пространственно-географического распространения и, очевидно, незначительном влиянии в пределах территории Российской Федерации в целом.

Кроме высокой степени изученности этих проблем, механизмы снижения их негативного воздействия также хорошо разработаны и, в ряде случаев, уже продемонстрировали свою эффективность (Авиационные правила, 2002; Асатуров, 2010; Николайкина и др., 2006). Поэтому количественная оценка и предотвращение последствий авиационного шума и вибрации, а также электромагнитных и ионизирующих излучений, возникающих при эксплуатации авиационной техники и обслуживающей ее аппаратуры, в настоящей работе не рассматриваются.

Более серьезной проблемой представляется исследование широкомасштабных воздействий на окружающую среду и климат загрязняющих веществ и парниковых газов, образующихся в результате сгорания топлива в двигателях воздушных судов. Не менее важен и анализ совокупного воздействия авиационных выбросов на климатическую систему. Эти проблемы, до последнего времени сравнительно мало изученные, сейчас приобретают особую значимость в связи с нарастанием глобальных изменений климата и активной разработкой противодействия им, в том числе, путем использования системы ограничительных мер на нормативно-правовом уровне. Примером подобных мер является принятая в странах-участницах Европейского союза система торговли выбросами парниковых газов, включающая, помимо прочего, и гражданскую авиацию. Следует отметить, что учет деятельности гражданской авиации в европейской системе торговли выбросами производится на основе территориально-географической дифференциации операционной деятельности отдельных авиаперевозчиков (Дмитриева, 2009; Дмитриева, Метальников, 2006). Между тем использование нормативно-правовых инструментов смягчения антропогенных изменений климата возможно только при наличии полной информации о характере и степени воздействия авиационных выбросов на окружающую среду и климатическую систему в пределах географической территории отдельных стран, что подтверждает актуальность и практическую значимость исследований выполненных автором диссертационной работы. Влияние гражданской авиации на окружающую среду и климат рассмотрено в следующем разделе.

1.3 Влияние гражданских воздушных судов на окружающую среду и климатическую систему

Воздействие гражданских самолетов на окружающую среду и климатическую систему главным образом связано со всесезонным выбросом в атмосферу продуктов сгорания топлив и горюче-смазочных материалов двигателями гражданских самолетов, о чем говорилось выше. На рисунке 3

показаны гражданские воздушные суда, которые в конкретный момент времени одновременно находятся в воздушном пространстве над территорией Российской Федерации (находящиеся в воздухе самолеты отмечены желтыми точками).

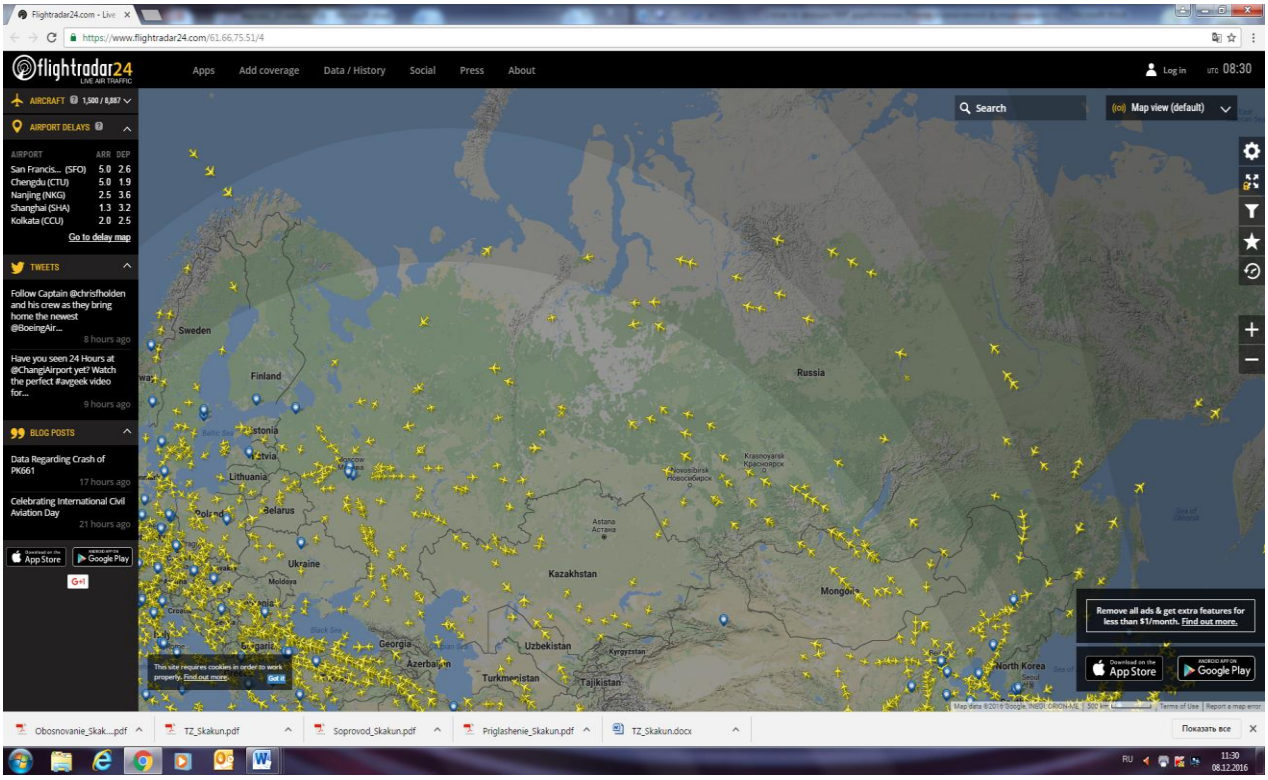

Рисунок 3 – Перемещение гражданских самолетов в воздушном пространстве Российской Федерации и сопредельных государств. Одновременно находящиеся в воздухе самолеты обозначены желтыми точками (по данным сайта https://www.flightradar24.com)

Из рисунка 3 видно, насколько высока их концентрация над территорией России. Следует отметить, что, несмотря на высокую концентрацию самолетов в верхней и нижней тропосфере, пространственное их распределение в пределах географической территории страны носит неравномерный характер. Наибольшая плотность воздушных судов наблюдается над ЕЧР, югом Сибири и над Дальним Востоком, а также в районах крупных городских образований и транспортно-пересадочных центров. От этого, безусловно, страдает окружающая среда и локальный климат соответствующих географических районов. При этом связанная с выбросами нагрузка на атмосферный воздух усиливается как в

планетарном пограничном слое, соответствующем географической локализации аэропорта, так и на высоте крейсерского полета, причем не только над прилегающими к аэропорту территориями, но и в маршрутных коридорах, что подтверждает выводы, сделанные при анализе рисунка 2. На рисунках 4 и 5 представлены карты регулярных маршрутов двух ведущих российских авиакомпаний «Аэрофлота» (рисунок 4) и «России» (рисунок 5).

Рисунок 4 – Карта-схема регулярных маршрутов авиакомпании «Аэрофлот» в пределах территории Российской Федерации и стран СНГ (источник: https://www.aeroflot.ru/ru-ru/flight/ways_map)

Анализ авиационной работы, выполняемой этими авиакомпаниями, свидетельствует о том, что полеты гражданских самолетов имеют значительную протяженность и проходят в различных географических и климатических зонах. Кроме того, как уже отмечалось выше, перемещение российских гражданских воздушных судов над территорией страны происходит круглогодично.

Рисунки 4 и 5 подтверждают, что локализация продуктов сгорания авиационного топлива в атмосферном воздухе уже не ограничивается только

географической территорией России. Авиационные выбросы распространяются за пределы воздушного пространства Российской Федерации. Соответственно влияние российских гражданских самолетов на атмосферу приобретает трансграничный, а по ряду веществ – глобальный характер. В таком случае особую значимость приобретает количественная оценка поступивших в атмосферу веществ из состава авиационных выбросов. По ней можно судить, насколько велики негативные эффекты для окружающей среды и климатической системы, вызываемые авиатранспортной деятельностью.

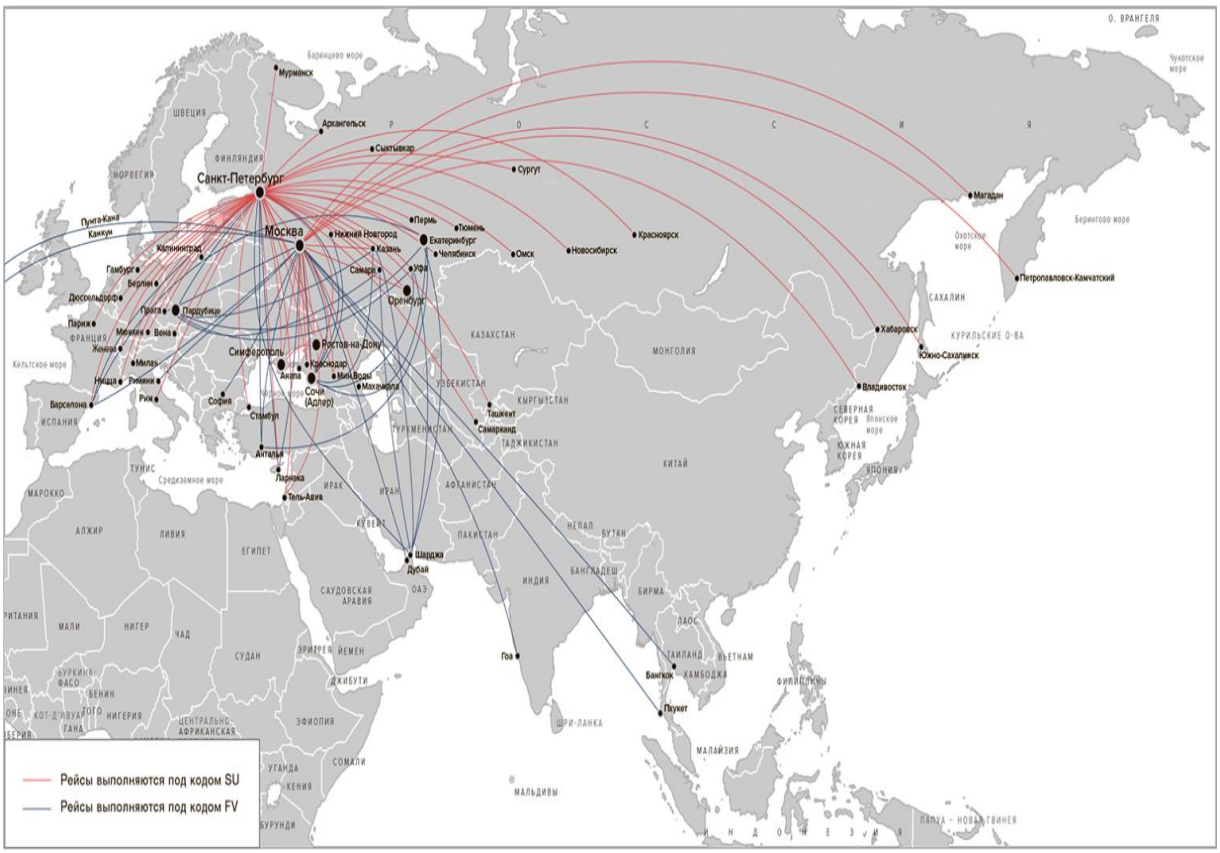

Рисунок 5 – Карта-схема маршрутов авиакомпании «Россия» в пределах территории Российской Федерации, стран СНГ и дальнего зарубежья (источник https://www.rossiya-airlines.com/about/about_us/flightmap/)

Уровень химического загрязнения окружающей среды выбросами воздушных судов (компонентный состав, скорость образования и поступления загрязняющих веществ в атмосферу) зависит от экологического совершенства

авиационных двигателей, интенсивности воздушного движения и объема выполняемой авиатранспортной работы (количества перевезенных пассажиров и грузов), а также организации перемещения самолетов в воздушном пространстве (диспетчирование). Те же факторы определяют интенсивность поступления в атмосферу и парниковых газов, входящих в состав авиационных выбросов.

Современные авиадвигатели работают на углеводородных топливах сгорание которых происходит в специальных камерах при высоких температурах, достигающих 1700°С (2000 К), и избытке нагнетаемого воздуха. Уровень совершенства авиадвигателей очень высок и достигнутые в современных их конструкциях коэффициенты полноты сгорания топлива близки к 0,96 в режиме малого газа[5] и 0,99 в расчетных режимах работы.[6] Большой прогресс в конструировании двигателей, достигнутый в последней четверти 20 века, в частности, был связан со стремлением снизить содержание загрязняющих веществ в отходящих газах. Основные виды используемого авиационного топлива – керосин и бензин – несколько отличаются по составу выделяющихся продуктов сгорания.

Бензины содержат в своем составе в основном парафино-нафтеновые ароматические и непредельные углеводороды с добавлением антиокислителя и антидетонатора – этиловой жидкости, которая в своем составе имеет до 50% тетраэтилсвинца. В состав всех бензинов входят сернистые соединения, количество которых незначительно: от 0,05 до 0,3% (Яновский, 2004). При сгорании авиационного этилированного бензина в авиадвигателях самолетов, атмосферный воздух загрязняется соединениями серы и аэрозолями свинца. Однако сейчас авиационный бензин используется в ограниченных количествах и лишь воздушными судами малой авиации, общее количество полетов которых незначительно, и они носят узколокальный характер. Поэтому, при рассмотрении широкомасштабного загрязнения воздуха выбросами гражданских воздушных

---

[5] Малый газ - минимальный устойчивый режим работы авиационного двигателя

[6] Расчетный режим работы - задаваемый при проектировочном расчёте авиационного воздушно-реактивного двигателя режим его работы

судов, сжиганием авиационного бензина можно пренебречь. Особое внимание следует уделить продуктам горения наиболее распространенного самолетного топлива – авиационного керосина (ИКАО, 2008; Характеристики воздушных судов, 2010; Харин и др., 2002; Яновский и др., 2002; и др.).

Авиационные керосины – смесь парафиновых, нафтеновых и ароматических углеводородов с содержанием до 20 – 22%. Количество в них непредельных углеводородов допускается не более 1 – 2% (Яновский, 2004). При сжигании авиационного керосина в двигателе воздушного судна происходят выбросы веществ, которые способны оказать негативное воздействие на окружающую среду и климатическую систему. Спектр поступающих в атмосферу газообразных и мелкодисперсных продуктов сгорания авиационного топлива и характер их воздействия на климатическую систему и на окружающую среду представлены на рисунках 6 и 7, взятых из аналитического обзора ИКАО (ICAO, 2010) и переработанных автором для целей настоящего исследования. Немаловажно отметить, что, несмотря на значительные теоретические и экспериментальные исследования, знания о характере влияния авиационных выбросов на окружающую природную среду и хозяйственно-экономическую деятельность человека все еще не достаточны, о чем свидетельствует рост научной неопределенности в этой области, показанный в правой части рисунков 6 и 7. Необходимость получения дополнительных знаний о характере воздействия продуктов авиационных выбросов подтверждает актуальность и научно-практическую значимость заявленных автором цели и задач диссертационного исследования.

Как видно из рисунка 6, в отличие от идеализированных условий, рассмотренных в разделе 1.1, фактическое воздействие гражданской авиации на климатическую систему обусловлено поступлением в атмосферный воздух таких продуктов сгорания авиационного топлива как диоксид углерода (CO_2), пары воды (H_2O), метан (CH_4) и оксид диазота (N_2O). Кроме того, в продуктах сгорания авиатоплив содержатся аэрозоли сажи и минеральной пыли (Climate Change, 2013; ICAO, 2010; IPCC, 1999; IPCC, 2006; и др.).

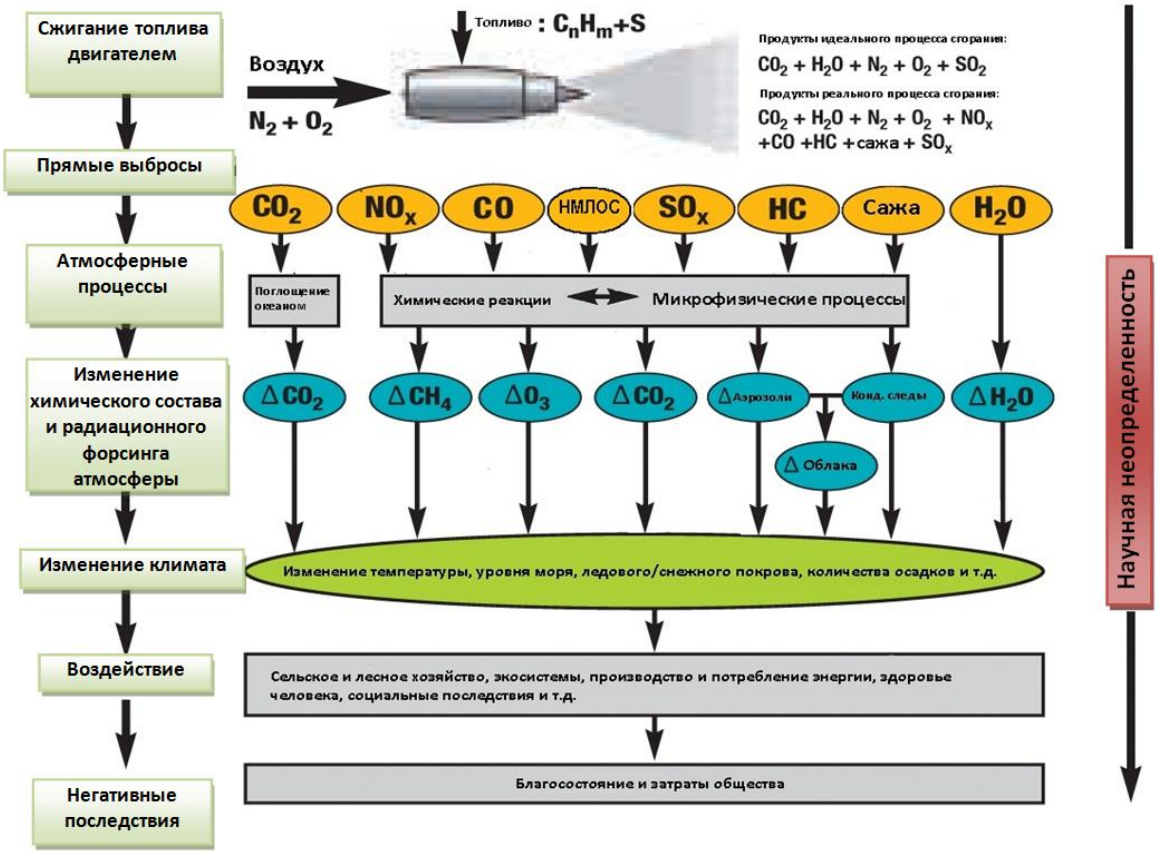

Рисунок 6 – Воздействие на климатическую систему газообразных и мелкодисперсных веществ из состава выбросов гражданских воздушных судов (адаптировано автором по данным обзора ИКАО (ICAO, 2010))

Эти химические вещества и соединения меняют оптические свойства, радиационный баланс и температурный режим атмосферы. Выбросы водяного пара также способствуют возникновению конденсационных следов, которые формируют нагревающие атмосферу стратосферные облака. Повышение температуры в системе «земная поверхность — атмосфера» в условиях избытка тепловой энергии усиливает естественный парниковый эффект и индуцирует цепь последовательных изменений климатической системы. Газы CO_2, CH_4 и N_2O получили название газов с прямым парниковым эффектом. Характер воздействия каждого из перечисленных соединений подробно рассмотрен ниже.

Кроме газов с прямым парниковым эффектом в авиационных выбросах содержится ряд газообразных соединений, таких как диоксид серы (SO_2),

монооксид углерода (CO) и окислы азота (NO_x), которые сами по себе не способствуют образованию парникового эффекта, но активно участвуют в атмосферных фотохимических реакциях, индуцируя образование диоксида углерода и озона (рисунок 7). Эти газообразные соединения носят название предшественников парниковых газов или газов, оказывающих косвенное воздействие на климат (Семенов, 2004; МГЭИК, 2007; Climate Change, 2013). В составе выбросов продуктов сгорания авиационного керосина в незначительных количествах в атмосферу также могут поступать летучие углеводороды неметанового ряда (C_nH_m), образующиеся в случае его неполного сгорания (IPCC, 1999; IPCC, 2006). Если газы с прямым парниковым эффектом CO_2, N_2O и CH_4, водяной пар, частицы сажи и минеральной пыли не являются загрязняющими веществами, то газы, оказывающие косвенное воздействие на климат – SO_2, CO, NO_x, C_nH_m и некоторые парниковые газы группы галоуглеводородов – классифицируются как загрязняющие вещества, высокие концентрации которых способны оказать неблагоприятное влияние на окружающую природную среду и человека (Swart et al., 2004, ГОСТ Р ИСО 14965-2008, 2009).

Помимо названных загрязняющих веществ, в атмосферных выбросах продуктов сгорания авиационных керосинов могут присутствовать SO_3, SO, H_2SO_3, H_2SO_4, HNO_2, HNO_3, N_2O, NO_3, а также ионы OH^-, HSO_4^-, NO_3^-, NO_2^-, $C_2H_3O^+$, NO^+, H_3O^+, которые также относятся к загрязняющим атмосферный воздух веществам (Волков, 1999; Филов, 1990, ГОСТ 17.2.2.04-86, 1986). Одновременное с парниковыми газами поступление загрязняющих веществ в атмосферу дает основание говорить о совокупном негативном эффекте для климатической системы, производимом авиационными выбросами (рисунок 7).

В верхних слоях тропосферы выбросы загрязняющих веществ оксида углерода (CO), углеводородов (C_nH_m), оксидов азота (NO_x) и серы (SO_x), а также сажи участвуют в атмосферных химических реакциях и макрофизических процессах. Некоторые из продуктов их химического превращения в атмосфере оказывают охлаждающее действие благодаря отражению коротковолнового солнечного излучения (Семенов, 2004; МГЭИК, 2007; Climate Change, 2013).

Кроме того, они также участвуют в трансграничном и дальнем переносе загрязняющих веществ.

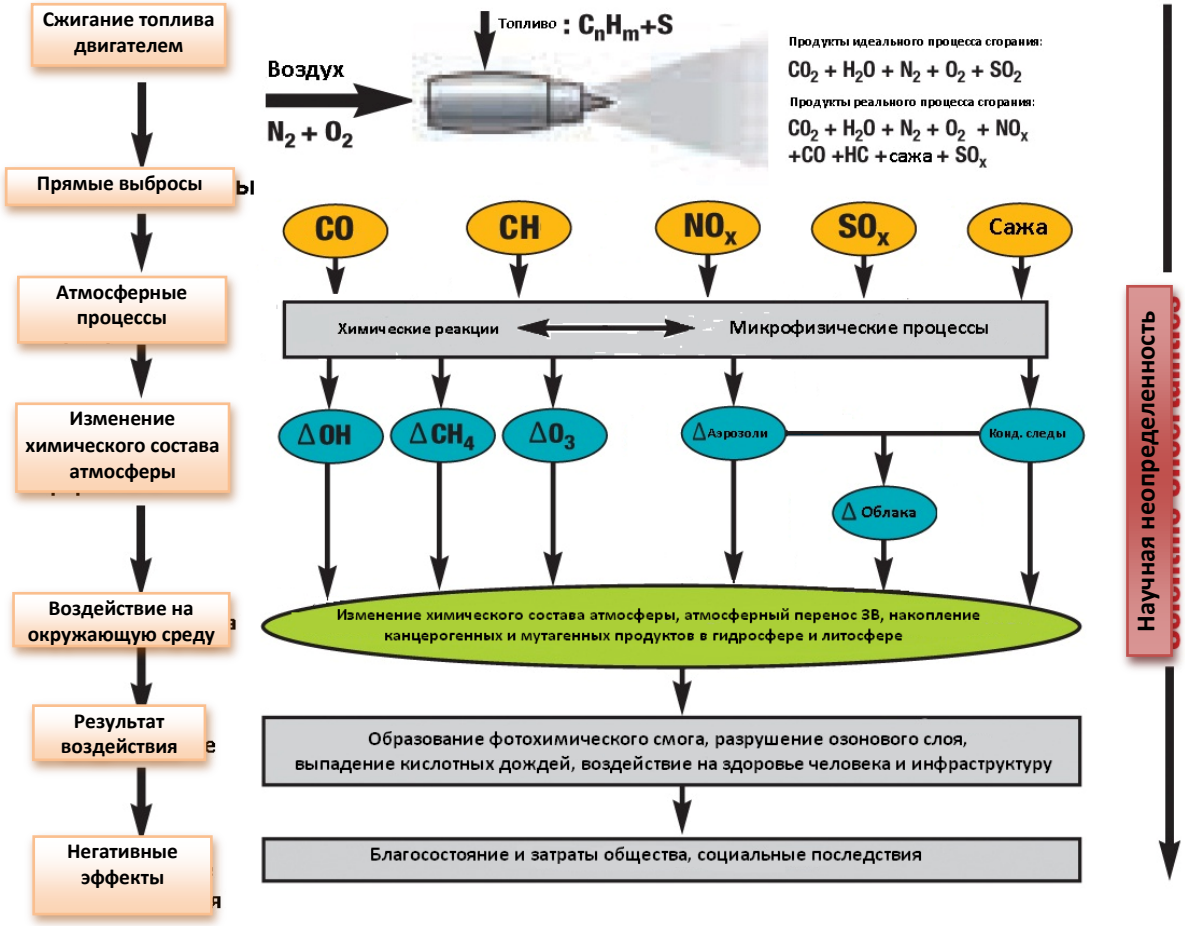

Рисунок 7 – Воздействие на окружающую среду загрязняющих веществ из состава выбросов гражданских воздушных судов (составлен автором по данным ИКАО (ICAO, 2010))

Вместе с топливом в авиации используются **минеральные масла**. Их основными компонентами являются ароматические, алифатические и нафтеновые углеводороды и производные сернистых и азотных соединений. Для улучшения эксплуатационных свойств в состав нефтяных масел также вводят различные антиокислительные и антикоррозийные присадки. При попадании на разогретый металл минеральные масла разлагаются на легкие фракции (аэрозоль, пары), альдегиды, кетоны, органические кислоты, оксид и диоксид углерода и другие

продукты (рисунок 7). При этом соотношение химических соединений в образующейся летучей смеси может изменяться в значительных пределах в зависимости от марки масла, температуры его разложения и величины барометрического давления.

Рассмотрим более детально характер воздействия основных парниковых газов и загрязняющих веществ из состава выбросов двигателей воздушных судов, представленных на рисунках 6 и 7. **Пары воды**, образующиеся в результате сгорания авиатоплива, непосредственно участвуют в образовании **конденсационных** следов. Конденсационные следы характерны для крейсерского режима полета гражданских воздушных судов в верхней тропосфере. Наряду с непосредственным выбросом в составе продуктов сгорания, водяной пар образуется и при конденсации в результате контакта с холодным воздухом высокотемпературных потоков газо-воздушной смеси, выбрасываемых авиационными двигателями. На интенсивность образования водяного пара влияет также метан, который в стратосфере подвергается химическому разрушению, сопровождающемуся выделением незначительного количества H_2O. В холодных воздушных массах тропосферы выбросы паров воды также могут содействовать увеличению перистой облачности. Конденсационные следы и наведенная перистая облачность отражают солнечную коротковолновую радиацию, и улавливают отраженную длинноволновую радиацию, обеспечивая, в конечном счете, рост температуры верхних слоев атмосферы и, соответственно, наведенный парниковый эффект, способствующий потеплению климата.

В тропосфере водяной пар может сохраняться от нескольких часов до 9 дней. Таким образом, образование водяного пара в конденсационных следах воздушных судов способствует образованию облаков верхнего яруса (перистые облака) и приводит к усилению парникового эффекта, а интенсивное воздушное движение приводит к росту содержания водяного пара и частоты образования конденсационных следов и облаков в верхнем ярусе тропосферы. В случае достижения стратосферы, водяной пар может оставаться в ней от нескольких месяцев до нескольких лет. При этом накопление образуемых самолетами паров

воды помимо изменения атмосферного теплообмена может нарушить естественный гидрологический баланс и оказать химическое воздействие на стратосферный озон, увеличив вероятность образования озон разрушающих стратосферных облаков и последующего охлаждения стратосферы (IPCC, 1999; Кароль, 2000; Александров и др., 1992; Израэль и др., 2003; МГЭИК, 2007, IPCC, 2013; и др.).

На основе сравнительного анализа массы H_2O, поступающей в атмосферу при полетах дозвуковой авиации, и содержания влаги вблизи тропопаузы МГЭИК сделан вывод о том, что воздействие выбросов от авиации на изменение содержания водяного пара в атмосфере невелико. Однако в сухой стратосфере на высотах около 20 км авиационные выбросы водяного пара могут составить значительную долю его суммарного стратосферного источника (IPCC, 1999, МГЭИК, 2007, IPCC, 2013; и др.). Поскольку операционная деятельность российской гражданской авиации происходит на уровне тропопаузы и ниже, то ее вклад в образование высотных стратосферных облаков следует считать малозначимым.

Наиболее изученным химическим соединением, оказывающим воздействие на изменение климата, является **диоксид углерода**. Как уже упоминалось в разделе 1.1, наряду с водяным паром, CO_2 является основным продуктом, образующимся при горении авиационного топлива. При рассмотрении характера его воздействия необходимо учитывать особую роль атома углерода среди других химических элементов, которая обусловлена его электронейтральностью, способствующей взаимодействию однородных атомов друг с другом и приводящей к образованию устойчивых соединений простой и сложной структуры. В до-индустриальный период (приблизительно до 1750 года) концентрация CO_2 в атмосфере в течение тысячи лет оставалась практически постоянной – 280±10 млн$^{-1}$ (512,3±18,3 мг м$^{-3}$), а его естественные потоки находились в равновесном состоянии. Однако с активизацией хозяйственной деятельности возросло антропогенное преобразование природных экосистем, а также потребление связанных твердых, жидких и газообразных соединений

углерода (ископаемые энергоресурсы уголь, нефть и газ), что, в конечном итоге, привело к интенсивному его окислению в газообразные продукты (CO_2, CO и др.) и их последующему поступлению в атмосферу (Саркисов, Рудаков, 1999; Emissions and Dispersion, 2001; IPCC, 2001, МГЭИК, 2007, IPCC, 2013; и др.). По последним оценкам, в 2011 г. средняя глобальная атмосферная концентрация диоксида углерода выросла до 391 млн$^{-1}$ (715,4 мг м$^{-3}$), что на 40% выше ее доиндустриального уровня (IPCC, 2013).

Вклад основных видов транспорта в мировой выброс диоксида углерода в середине 90-х годов распределился следующим образом: железнодорожный и речной транспорт – 6%, авиация – 12%, морской транспорт – 7%, тяжелые грузовые автомобили – 45%, а легковые автомобили – 30%. По некоторым оценкам, выбросы авиации составляли около 2,4% глобального выброса CO_2 от всех промышленных источников, но в связи с ростом авиаперевозок, к 2050 году эта величина может превысить 7%, даже несмотря на внедрение новых технологий по сокращению величины удельного авиационного выброса (IPCC, 1999; Фрумин, 2002; Key GHG Data, 2005, МГЭИК, 2007, IPCC, 2013; и др.). Подобный вклад в глобальный выброс CO_2 только одного вида транспорта представляется достаточно весомым, и его нельзя не учитывать при оценках влияния антропогенной деятельности на окружающую среду и климат.

Поскольку скорость окисления углерода до CO_2 и интенсивность антропогенного выброса углеродосодержащих соединений в атмосферу значительно превышают естественные, а время пребывания CO_2 в атмосфере по разным оценкам составляет 50 – 200 лет (принятое среднее значение составляет 100 лет), диоксид углерода, безусловно, является наиболее важным по воздействию на климатическую систему парниковым газом (МГЭИК, 2007; Brasseur et al., 1998; ICAO, 2004; Seinfeld et al., 2006; и др.). В связи с продолжительным нахождением в атмосфере, он полностью перемешивается с воздухом и легко распространяется на большие расстояния. Таким образом, авиационные выбросы от гражданских самолетов российского авиапарка

способствуют не только локальному, но и глобальному росту концентрации CO_2 в верхних слоях тропосферы.

Метан является следующим по распространенности после водяного пара и CO_2 парниковым газом, содержащимся в струе выхлопа воздушного судна (рисунок 6). Благодаря своему строению и молекулярному весу, он более активен, чем CO_2, и играет важную роль в тропосферных и стратосферных химических процессах. Метан участвует в образовании газов, оказывающих косвенное воздействие на климат – CO и NO_x. Из-за сравнительно высокой фотохимической активности время пребывания его в атмосфере составляет 8 – 12 лет и тесно связано с широтным распределением солнечного излучения (Brasseur et al., 1998; Seinfeld et al., 2006; Wuebbles, Hayhoe, 2000; МГЭИК, 2007; IPCC, 2013; и др.). В доиндустриальную эпоху содержание метана в атмосфере составляло около 700±70 млрд$^{-1}$ (0,47±0,05 мг м$^{-3}$). Однако к 2011 г. оно увеличилось до 1 803 млрд$^{-1}$ (1,20 мг м$^{-3}$), то есть на 150% (IPCC, 2001; IPCC, 2013). Интересной особенностью динамики CH_4 является отмечавшееся повсеместно резкое падение его атмосферных концентраций в 1991–1994 гг., которое, впрочем, не изменило общих тенденций роста его содержания в атмосферном воздухе. По разным оценкам, в конце 20 века содержание CH_4 в атмосфере возрастало на 20-22 Мт CH_4 год$^{-1}$. Выбросы метана увеличились в результате деятельности человека, связанной с сельским хозяйством, активной добычей и последующим использованием природного газа и деятельностью по обращению с отходами. В частности, эмиссия метана от добычи, транспортировки, переработки и энергетического использования ископаемых топлив достигает 110 Мт CH_4 год$^{-1}$. Вклад антропогенных выбросов метана в парниковый эффект составляет около 20% (Dlugokencky et al., 1998; Lelieveld et al., 1998; IPCC, 2001; МГЭИК, 2007; и др.).

Доля парниковых газов CH_4 и предшественников озона NO_x, CO и SO_x в общей массе выбросов гражданских воздушных судов невелика. Наряду с более сложными углеводородными соединениями, которые содержатся в струе выхлопа, такими как ацетилен (C_2H_6), этан (C_2H_4), бензол (C_6H_6), альдегиды (формальдегид

(HCHO), уксусный альдегид (CH_3CHO) и др.) и летучие органические соединения неметанового ряда, метан является частью несгоревших углеводородов C_nH_m. Однако CH_4 обладает большим, чем диоксид углерода, потенциалом глобального потепления, и, следовательно, его воздействие на климатическую систему будет более значимым (IPCC, 2001; IPCC, 2013).

Большая часть содержащегося в атмосфере **оксида диазота** (N_2O) имеет биогенное происхождение, и является промежуточным продуктом нитрификации и денитрификации азотсодержащих соединений в почве и водных экосистемах в процессе их биохимического окисления и восстановления. Потоки N_2O имеют значительную пространственную и временную вариабельность. В доиндустриальную эпоху эмиссия оксида диазота изменялась от 12,6 до 20,4 Мт N_2O год$^{-1}$ при средней величине около 17,3 Мт N_2O год$^{-1}$, а концентрация в атмосфере составляла 270 млрд$^{-1}$ (0,49 мг м$^{-3}$). Но в 2011 г. его концентрация в атмосфере возросла до 324 млрд$^{-1}$ (0,59 мг м$^{-3}$), то есть на 20% по сравнению с доиндустриальным уровнем (IPCC, 2001; IPCC, 2013). Время жизни N_2O в атмосфере составляет от 109 до 123 лет, что свидетельствует о его высоком накопительном потенциале и, соответственно, существенном воздействии на климат Земли (Seinfeld et al., 2006; UNEP, 2011). Антропогенный вклад в эмиссию N_2O в атмосферу ежегодно составляет около 55%, а его содержание в ней ежегодно увеличивается на 6,0 – 6,2 Мт. Выбросы от промышленности, энергетики и транспорта составляют около 2,0 Мт N_2O год$^{-1}$ (Brasseur et al., 1998; Kroeze et al., 1999; Wiesen et al., 1994).

В настоящее время нет единого мнения о наличии оксида диазота в авиационных выбросах. По некоторым данным в авиационном выхлопе он отсутствует ввиду того, что это соединение термически нестабильно, и при рабочих температурах в камере сгорания полностью разлагается (ГосНИИГА, 2007; UNEP, 2011). С другой стороны, по мнению ряда исследователей, N_2O может образоваться в результате высокотемпературного окисления авиационного топлива (Hayhurst, Lawrence, 1992; IPCC, 1999; МГЭИК, 2007; IPCC, 2013; и др.). С учетом существенного воздействия на климатическую систему оксида диазота,

автором сделано допущение о его присутствии в выбросах воздушных судов гражданской авиации, что согласуется с подходами МГЭИК об оценке выбросов парниковых газов от авиационного транспорта (IPCC, 2001; IPCC, 1999; МГЭИК, 2006; и др.). Таким образом, потенциальное воздействие N_2O учтено в расчетах выбросов от гражданской авиации.

Озон, находящийся в тропосфере (вне озонового слоя Земли), является короткоживущим парниковым газом. В атмосфере он образуется в результате ряда последовательных фотохимических реакций с участием нескольких химически активных газов (предшественников озона). К их числу относят монооксид углерода (CO), оксиды азота (NO_x) и углеводороды (C_nH_m), присутствующие в выбросах авиадвигателей. Вследствие высокой реакционной способности концентрация озона в тропосфере отличается значительной пространственной и временной изменчивостью. Повышенные его концентрации в тропосфере усиливает парниковый эффект. Ввиду сложности количественной оценки озона, образующегося благодаря атмосферным химическим реакциям содержащихся в выбросах воздушных судов веществ, оценка его воздействия на климатическую систему крайне затруднительна, следствием чего является отсутствие надежной методологии количественной оценки. Поэтому в настоящей работе воздействие озона не рассматривается.

Воздействие, вызванное **газообразными веществами, оказывающими косвенное воздействие на климат, и аэрозолями,** далеко не однозначно. **Сера**, входящая в состав авиационного топлива, поступает в атмосферу преимущественно в виде SO_2. Величина авиационных выбросов соединений серы зависит от ее содержания в топливе, которое можно уменьшить благодаря очистке. Однако высокая степень очистки не только повышает себестоимость авиатоплива и, соответственно, цену, но и может привести к изменению его физических свойств. Так, при малом содержании серы уменьшается вязкость топлива, что усложняет работу систем топливозаправки, и, кроме того, ухудшается подача топлива к двигателям самолета во время полета (Кароль, 1996; Airtraffic, 2001; Smith et al., 2011).

Как указано в разделе 1.1, из-за неполного сгорания авиатоплива, в атмосферный воздух могут попадать незначительные количества и других соединений серы. Фотохимическое окисление диоксида серы в тропосфере приводит к образованию озона, обладающего парниковым эффектом (IPCC, 2001; Lee et al., 2009; Miake-Lye et al., 1993). Достаточно быстро SO_2 и другие ее соединения преобразуются в серную кислоту и затем в аэрозоли сульфатов. В верхнем слое тропосферы, особенно на высоте тропопаузы, аэрозоли сульфатов, являющиеся конечными продуктами химических превращений соединений серы, отражают коротковолновое солнечное излучение и, тем самым, способствуют снижению температуры воздуха, то есть охлаждению атмосферы (МГЭИК, 2007; Lee et al., 2009; Гинзбург и др., 2008; Seinfeld et al., 2006; и др.). Иными словами, в нижних слоях тропосферы соединения серы обладают положительным радиационным форсингом и усиливают парниковый эффект, а вблизи тропопаузы эти же соединения его ослабляют (Кароль, 1996; ICAO, 2010; Karcher et al., 1998).

Глобальные выбросы в атмосферу диоксида серы достигли максимума в 1980-е годы (более 133 Мт SO_2 год$^{-1}$), после чего начался их спад, продолжавшийся до 2000 года, когда величина выбросов снизилась до 111 Мт SO_2 год$^{-1}$. В 2I веке выбросы SO_2 снова начали расти, и в 2005 году их величина вплотную приблизилась к 120 Мт год$^{-1}$. Наблюдающееся повышение выбросов обусловлено интенсивным потреблением ископаемых топлив, связанным с экономическим ростом, происходящем в Китае, Индии и других развивающихся странах (Isaksen et al., 2009; Smith et al., 2011).

Сажа, оксиды металлов, пары серной и, возможно, азотной кислот, наряду с водяным паром входящие в состав выбрасываемых авиадвигателями **тонкодисперсных аэрозолей**, могут стимулировать химические реакции в атмосфере, поглощать или рассеивать радиацию и изменять характер облачности, приводить к образованию конденсационных следов или перистых облаков (Кондратьев, 1998; МГЭИК, 2007; IPCC, 2013). Химический состав аэрозольных выбросов и их взаимодействие с атмосферой пока еще мало изучены (Израэль, 2005; Кондратьев, 1998). Однако известно, что содержащиеся в авиационных

выбросах частицы сажи, покрытые слоем H_2SO_4, участвуют в формировании конденсационных следов. Непосредственно выбрасываемые авиадвигателями частицы сажи и формирование аэрозолей *in situ* могут также выполнять функции ядер конденсации, которые наряду с фоновыми аэрозолями содействуют формированию конденсационных следов и перистой облачности. Наземные и спутниковые наблюдения фиксируют немало случаев в окрестностях аэропортов с интенсивным движением, когда облачность, вызванная конденсационными следами, достигает 1-2 баллов при безоблачном небе.

Следует отметить, что выбросы **сажи**, как правило, невелики и зависят от режима работы двигателя и характера горения топлива в камерах сгорания. В то же время, интенсивно поглощая коротковолновую радиацию, сажа влияет на ее потоки и участвует в разрушении озона, образовании смога и кислотных дождей. Поскольку фоновая концентрация частиц сажи в верхней тропосфере и нижней стратосфере мала, вклад авиационных выбросов в их содержание может быть заметным (ICAO, 2010).

Таим образом, воздействие на климатическую систему мелкодисперсных частиц из состава выбросов гражданских воздушных судов можно разделить на прямое, связанное с поглощением или отражением солнечной радиации, и косвенное, проявляющееся в изменении облачного альбедо (Гинзбург и др., 2008; Кондратьев, 1998). Также стоит отметить, что некоторые типы аэрозолей создают положительный парниковый эффект, а другие – отрицательный. Однако большинство исследователей сходятся во мнении, что прямое воздействие аэрозоля на радиационный бюджет системы «атмосфера – земная поверхность» является отрицательным и составляет $-0{,}5\pm0{,}4$ Вт $м^{-2}$, как и совокупное (прямое и косвенное), величина которого $-1{,}3\pm0{,}8$ Вт $м^{-2}$ (Израэль, 2007; Оценочный доклад, 2008; Ревокатова, Рябошапко, 2015; Crutzen, 1991; и др.). Таким образом, наличие в атмосферном воздухе аэрозоля способствует некоторому охлаждению климатической системы. Отметим, что высокая вариация по отношению к средней величине оценки воздействия аэрозоля указывает на существенную неопределенность данных и, соответственно, пока еще недостаточную

изученность механизмов его воздействия на атмосферу в целом. Однако не вызывает сомнений, что, несмотря на отрицательное радиационное воздействие, присутствие антропогенных аэрозольных частиц вызывает дисбаланс естественных фотохимических процессов и нарушение оптических свойств атмосферы.

Оксиды азота в авиационнных выбросах в основном представлены его оксидом (**NO**) и диоксидом (**NO_2**). Суммарная антропогенная эмиссия оксидов азота составляет 110,7 Мт год$^{-1}$. Вклад транспорта может достигать 40% суммарной антропогенной эмиссии NO_x (МГЭИК, 2006; IPCC, 2001; Levy et al., 1999; Seinfeld et al., 2006). Выбросы оксидов азота определяются режимом горения в камерах двигателей и возрастают с повышением температуры сжигания, которая определяет более экономичный режим их работы (ICAO, 2010, МГЭИК, 2007; IPCC, 2013). NO_x влияют на химический состав атмосферы, разрушение и образование озонового слоя, а также вносят ощутимый вклад в образование смога и кислотных дождей. В ходе газофазных окислительных процессов, в которых участвуют в основном летучие органические соединения, олефины и оксиды азота, образуются органические кислоты, главным образом, муравьиная (HCOOH) и уксусная (CH_3COOH), которые являются предшественниками кислотных дождей (Иванов, 2000). Процессы, посредством которых NO_x воздействует на химический состав атмосферы, сложны и разнообразны, что зависит от таких факторов, как время года и местоположение выброса (Оценочный доклад, 2008; Второй оценочный доклад, 2014; МГЭИК, 2007; IPCC, 2013).

Оксиды азота активно участвуют в атмосферном переносе, многочисленных химических реакциях, и, наконец, выводятся из атмосферы на подстилающую поверхность в форме сухих и влажных выпадений. При этом NO_2 выводится быстрее, чем NO. Окислы азота имеют короткое время пребывания в атмосфере (от нескольких часов до 2-х недель в зависимости от времени суток, географической широты и степени загрязнения атмосферы). Потому оценка их суммарного выпадения затруднительна (МГЭИК, 2006; IPCC, 1999; Miake-Lye et

al., 1993; Paramonov et al., 1999). Воздействие оксидов азота носит разнонаправленный характер – в ряде случаев они оказывают не только прямое положительное воздействие на температуру в приповерхностном слое, но и косвенное, которое оценить несколько сложнее. Они сами по себе обладают парниковыми свойствами, то есть способствуют потеплению. Кроме того, до высот 16-20 км рост концентрации оксидов азота в тропосфере приводит к ее обогащению озоном – сильным парниковым газом, что еще более усиливает тепловой эффект. Концентрации оксидов азота в атмосферном воздухе способствуют росту содержания радикалов гидроскила OH^- и возбужденных атомов кислорода $O(^1D)$, с которыми реагирует метан. Таким образом, рост содержания NO_x в атмосфере способствуют уменьшению концентрации метана, и, в конечном счете, приводит к охлаждению приповерхностного слоя воздуха и ослаблению парникового эффекта (Levy et al., 1999; Brasseur et al., 1998). Тем не менее, интегральное воздействие оксидов азота на окружающую среду и климатическую систему все-таки считается более негативным, чем позитивным (Skeie et al., 2009).

При взаимодействии NO_x с соединениями хлора, находящимися в атмосфере, в приосевой части струи формируется область с повышенным уровнем концентрации свободного хлора. Так, на оси струи на расстоянии 100 м от среза сопла дозвукового самолета концентрация свободного хлора в 1000 раз превосходит фоновую, а концентрация $ClNO_3$ - в 400 раз. Взаимодействие CH_3 с NO_2 и NO_3 приводит к возникновению новых компонентов CH_3NO_2 и CH_3NO_3, которые также являются атмосферными загрязнителями (Саркисов, Рудаков, 1999; Волков, 1999; Филов, 1990; ГОСТ 17.2.2.04-86, 1986).

Согласно модельным оценкам, современные глобальные выбросы NO_x авиацией мира составляют до половины содержания NO_x в слое 9 – 12 км, то есть в зонах коридоров интенсивных полетов (Кароль, 2000; Levy, 1999; UNEP, 2011; USEPA, 2004; и др.). В 1992 г. эмиссия NO_2, связанная с дозвуковыми воздушными судами, оценивалась как увеличивающая концентрацию O_3 на высоте крейсерского полета на 6%, а к 2050 г. этот эффект может возрасти до 13%

(Александров и др., 1992; МГЭИК, 1997). Однако выше 20 км окислы азота уже будут разрушать озон (Александров и др., 1992). Увеличение концентрации NO_x в стратосфере, обусловленное полетами сверхзвуковой авиации, приводит к уменьшению концентрации озона и, как следствие, увеличению интенсивности биологически опасного ультрафиолетового излучения у поверхности земли. Снижение концентрации озона в атмосфере составляет от 3% на высоте 20 км до 23% на высоте 30 км. В коридоре полетов сверхзвуковой авиации снижение концентрации озона еще больше - около 50% (Кароль, 1996). Более глубокое проникновение ультрафиолетового излучения в тропосферу должно привести к увеличению концентрации озона и, таким образом, изменить ее радиационный баланс и температуру.

В то время как научное понимание и моделирование эффектов NO_x значительно улучшилось за последние несколько лет, все еще ощущается недостаток знаний в отношении точного размера воздействия, которое выбросы NO_x от воздушного транспорта оказывают на изменение климата, а также формирование озона и разрушение метана. Об этом свидетельствует рост научной неопределенности на рисунке 6.

Величина выбросов **оксида углерода** довольно незначительна и зависит от режима горения в камерах двигателя. Масса его годового выброса составляет около 235 Мт год$^{-1}$. CO, как фотохимически активный газ, существенно влияет на сток гидроксила (OH) – основного атмосферного окислителя (Jones et al., 1999), способствующего образованию физико-химического смога и кислотных дождей. Вклад выбросов от дозвуковой авиации в общий фон CO изучен недостаточно и требует дальнейших исследований (Isaksen et al., 2009; Jones et al., 1999). Время жизни CO в атмосфере составляет примерно 1 – 3 месяца (Airtraffic, 2001). Интересной особенностью временного тренда CO в атмосфере является рост его содержания до конца 1980-х, и затем некоторое снижение, по всей вероятности, обусловленное повсеместным использованием каталитических конвертеров на автотранспорте (Bakwin et al., 1994; Brasseur et al., 1998). В таблице 2 обобщены

эффекты, производимые в различных слоях атмосферы химическими веществами и соединениями из состава авиационных выбросов.

Таблица 2 – Влияние выбросов гражданских самолетов на атмосферу (составлено по данным Александрова, 1992; IPCC, 1999; Lee et al., 2009; ICAO, 2010; и др.)

Химические вещества и соединения авиационных выбросов	**Слой атмосферы**	**Негативный эффект, производимый на атмосферу и климат**
Водяной пар (H_2O)	Верхняя тропосфера	Радиационный нагрев
	Стратосфера	Образование конденсационных следов, перистых и озон разрушающих стратосферных облаков, радиационное охлаждение атмосферы
Парниковые газы		
CO_2	Тропосфера	Радиационный нагрев
	Стратосфера	Радиационное охлаждение
CH_4	Тропосфера и нижняя стратосфера	Образование газов, оказывающих косвенное воздействие на климат – CO и NO_x, радиационный нагрев
	Стратосфера	Образование H_2O при фотохимическом разрушении
N_2O	Тропосфера и нижняя стратосфера	Радиационный нагрев
Загрязняющие вещества		
$NO + NO_2$	Верхняя тропосфера и нижняя стратосфера	Формирование смога и кислых осадков, рост содержания радикалов гидроскила, образование O_3 и нагрев нижней тропосферы
	Стратосфера выше 20 километров	Разрушение O_3 газофазное и с участием стратосферных облаков при увеличении частоты образования последних
SO_2+H_2SO_4	Тропосфера и нижняя стратосфера	Формирование конденсационных следов, перистых облаков и аэрозолей сульфатов, радиационное охлаждение

Окончание таблицы 2

Химические вещества и соединения авиационных выбросов	**Слой атмосферы**	**Негативный эффект, производимый на атмосферу и климат**
C_nH_m	Тропосфера и нижняя стратосфера	Образование предшественников O_3, радиационное охлаждение
CO	Тропосфера и нижняя стратосфера	Влияние на фотохимические атмосферные процессы, рост содержания гидроскила и образование O_3, радиационное охлаждение
Сажа	Тропосфера и нижняя стратосфера	Участие в образовании конденсационных следов, радиационный нагрев слоя выброса
Аэрозоли металлов	Тропосфера и нижняя стратосфера	Эффект несущественен

Важно отметить, что характер влияния продуктов сгорания авиатоплива и горюче-смазочных материалов зависит от высоты их образования и последующих перемещений в атмосфере, причем в разных ее слоях одни и те же химические соединения ведут себя совершенно по-разному, и их действие может оказаться зачастую противоположно направленным (таблица 1). Надо признать, что по выполненным оценкам эмиссия парниковых газов от воздушного транспорта (внутренние и международные авиаперевозки в сумме) незначительна и составляет менее 1% совокупного антропогенного выброса парниковых газов с территории Российской Федерации (Гинзбург и др., 2008, Гитарский и др., 2011; Российская Федерация, 2017; и др.). По данным РКИК ООН, доля выбросов парниковых газов CO_2, CH_4, а также предшественников парниковых газов – CO и NO_x от воздушных судов в результате международных авиаперевозок в экономически развитых странах, ратифицировавших Киотский протокол, составляет около 2% их суммарных выбросов, но в отдельных странах их доля может возрасти до 12% (Key GHG Data, 2005; РКИК ООН, 2007). Но, несмотря на незначительный вклад в выбросы, исследование воздействия авиации на

окружающую среду и климат представляет интерес из-за значительных темпов роста и интенсивного развития отрасли, о чем говорится во введении. Последние годы отмечены интенсивным ростом не только внутренних, но и международных авиаперевозок, в результате чего потребление авиационного топлива возрастает. Соответственно, возрастают выбросы загрязняющих веществ и парниковых газов, что, в конечном счете, приводит к росту нагрузки на климатическую систему. Дополнительную значимость этой проблеме придают намерения ряда государств включить гражданскую авиацию в перечень нормативно-правовых инструментов смягчения антропогенного воздействия на климат, о чем уже упоминалось в разделе 1.2 (Дмитриева, 2014; Дмитриева, Грабар, 2017; Гитарский и др., 2011; и др.). В 2016 г. Международная организация гражданской авиации (ИКАО) приняла резолюцию А39-3, содержащую решение о разработке Системы компенсации и сокращения выбросов углерода для международной авиации (CORSIA). Эта система основана на определении обязательств по снижению выбросов диоксида углерода для всех авиакомпаний, осуществляющих международные авиаперевозки, а также размеров их компенсационных выплат, обеспечивающих выполнение установленных обязательств. Корректное использование подобных инструментов возможно лишь при условии получения достоверных данных о массе ежегодных авиационных выбросов, методика расчета которых рассмотрена в следующей главе. В связи с вышеизложенным, актуальны количественные оценки ежегодного совокупного воздействия авиационных выбросов на атмосферу над территорией РФ, методика расчета которых предложена в настоящей работе.

Выводы по главе 1

По итогам 1 главы можно сделать следующие выводы:

- В условиях Российской Федерации воздушный транспорт является эффективным средством сообщения. Особенно велико его значение для

труднодоступных и отдаленных районов, составляющих две трети территории страны. Из-за значительной протяженности воздушных маршрутов, охватывающих разные географические и климатические зоны, выбросы от сгорания авиационного топлива и горюче-смазочных материалов происходят практически повсеместно. За счет атмосферного переноса вещества, входящие в состав выбросов, распространяются в атмосфере не только над территорией России, но и за ее пределами. Таким образом, влияние выбросов российских гражданских самолетов приобретает трансграничный, а по ряду веществ – глобальный характер, что обусловливает необходимость его изучения и количественной оценки.

- Гражданские воздушные суда и обслуживающая их наземная инфраструктура также оказывают звуковое, вибрационное, электромагнитное, ионизирующее и другие воздействия. Влияние шумовой и вибрационной нагрузок, электромагнитного и ионизирующего излучения на природные и хозяйственные системы в зоне аэропортов и прилегающей к ним территории достаточно хорошо изучено. Оно локализуется в ближней зоне аэропортов, за пределами которой негативные эффекты, вызываемые этими факторами воздействия, сравнительно невелики.

- Авиационные выбросы происходят в основном в планетарный пограничный слой и в верхнюю тропосферу. В них присутствуют пары воды и парниковые газы диоксид углерода (CO_2), метан (CH_4) и оксид диазота (N_2O) и загрязняющие вещества – углеводороды (C_nH_m), оксид углерода (CO), окислы азота и серы (NO_x и SO_x), аэрозоли и зольные элементы. Их влияние различается в зависимости от высоты выброса. Некоторые из продуктов химического превращения газообразных загрязняющих веществ в атмосфере могут усиливать наведенный парниковый эффект, другие оказывают охлаждающее действие благодаря отражению коротковолнового солнечного излучения. Приоритетными по характеру воздействия являются парниковые газы CO_2, CH_4, N_2O и газообразные загрязняющие вещества с косвенным воздействием на климат – C_nH_m, CO, NO_x и SO_2. Одновременное поступление в атмосферу парниковых газов

и газообразных загрязняющих веществ ставит вопрос об оценке производимого ими совокупного эффекта на климат.

- Перевозка грузов во внутреннем воздушном сообщении с 2000 по 2016 гг. возросла на 164%, а пассажиров – на 296%. Рост интенсивности авиаперевозок сопровождается увеличением выбросов и, соответственно, нагрузки на окружающую среду и климат. Дополнительную значимость этой проблеме придают намерения включить гражданскую авиацию в перечень инструментов смягчения антропогенного воздействия на климат. В связи с вышеизложенным, актуальны количественные оценки ежегодного совокупного воздействия авиационных выбросов на атмосферу над территорией Российской Федерации

ГЛАВА 2 МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКЕ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ И ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ОТ ГРАЖДАНСКИХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Принимая во внимание отмечающийся в начале 21 века рост интенсивности гражданских авиаперевозок в России, а также глобальный характер распространения продуктов выбросов авиадвигателей, автором разработаны методы и алгоритм расчета газообразных выбросов в атмосферу гражданскими воздушными судами приоритетных парниковых газов и загрязняющих веществ, оказывающих косвенное воздействие на климат. Выполнены расчеты их эмиссии российскими гражданскими воздушными судами в пределах территории Российской Федерации. Основу расчетов составили данные о работе гражданского авиатранспорта России с 2000 по 2015 гг. включительно. При этом учитывали все гражданские воздушные суда, находившиеся в эксплуатации у российских авиакомпаний и совершавшие перелеты во внутреннем сообщении. Поскольку в 2000 – 2015 гг. в российском гражданском авиапарке использовались только дозвуковые воздушные суда отечественного и зарубежного производства, расчеты выбросов сверхзвуковых самолетов не производились. В расчетах не учтены транзитные пролеты через территорию Российской Федерации воздушных судов иностранных авиакомпаний, а также зарубежные авиарейсы, выполнявшиеся российскими и иностранными авиаперевозчиками. Исключение транзитных пролетов и зарубежных авиарейсов обусловлено необходимостью использования результатов расчетов для проверки и верификации оценок выбросов, представляемых Российской Федерацией в органы РКИК ООН в рамках национальных обязательств по климатической отчетности (Российская Федерация, 2017). Независимая перепроверка результатов расчетов является важной частью мероприятий по контролю качества национальной климатической отчетности (МГЭИК, 2006), а использование для этих целей результатов диссертационного исследования подтверждает практическую ценность выполненной автором работы.

При разработке расчетного алгоритма выбросов парниковых газов были использованы методологические руководства Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК, 2006). Количественная оценка выбросов охватывала гражданские воздушные суда, которые осуществляют пассажирские и грузовые, в том числе, чартерные полеты в пределах территории Российской Федерации. Из расчетов исключали топливо, используемое наземным транспортом в аэропортах, сжигание топлива в стационарных условиях для получения тепла и энергии, а также в других целях функционального обеспечения аэропортового хозяйства. В свою очередь, алгоритм расчета массы газообразных загрязняющих веществ, поступающих в атмосферу в процессе эксплуатации гражданских воздушных судов, базируется на положениях законодательства Российской Федерации,[7] разработках Государственного научно-исследовательского института гражданской авиации (ГосНИИГА) и нормативах ИКАО (МАК, 2002; ГосНИИГА, 2002; ИКАО, 1977; ГосНИИГА, 1991). Методические разработки по оценке выбросов загрязняющих веществ двигателями воздушных судов гражданской авиации ГосНИИГА гармонизированы с международными методами расчета (ECAC, 2003; ГосНИИГА, 2002; Full Throttle Aerospace, 2001; CAEP, 2001; Emissions and Dispersion Modeling System, 2001; CAEP, 2000; и др.). При определении выбросов загрязняющих веществ воздушным судном также использовали Указание Департамента воздушного транспорта Минтранса России от 10.04.96 № ДВ-45/И «Об утверждении нормативов расхода топлива и технических скоростей на эксплуатацию воздушных судов» (Нормативы расхода, 1996).

Специфика авиационных выбросов заключается в том, что они либо могут быть локализованы в отдельных точках географического пространства, либо рассеиваются на значительные расстояния. Так выбросы при взлете и наборе высоты, снижении и посадке происходят в планетарном пограничном слое

---

[7] Федеральный закон «Об охране окружающей среды» № 2060-1. М., 1992, Федеральный закон «Об охране атмосферного воздуха» № 96-ФЗ. Собр. законод. РФ, 1999, № 18, Федеральный закон «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» № 52-ФЗ. Собр. законод. РФ, 1999.

атмосферного воздуха, и они локализованы в зоне аэропортов. При горизонтальном (крейсерском) полете авиационные выбросы оказываются рассеяны на значительные расстояния, причем на высоте, близкой к тропопаузе. Как указано выше, приземные и высотные авиационные выбросы оказывают разные по характеру и уровню значимости воздействия на окружающую среду и климат. В целях унификации расчетов выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов, а также учета различий в характере воздействия на разных высотах, было принято, что выбросы в атмосферный воздух от гражданских воздушных судов происходят:

- на уровне земной поверхности (учитываются запуск и остановка двигателей, руление перед взлетом и заруливание после посадки, опробование маршевых двигателей в стационарных условиях и работа вспомогательных силовых установок воздушных судов);
- в планетарном пограничном слое до высоты 900 м [8] от уровня земли во время набора высоты при взлете, либо во время снижения и посадки;
- на высотах от 900 м до уровня тропопаузы (9...13 км) во время крейсерского (горизонтального) полета дозвуковых самолетов.

Интенсивность эмиссии загрязняющих веществ и парниковых газов зависит от фазы работы двигателей воздушного судна, которые определяются сегментом полета. Работу, выполняемую авиационными двигателями, с момента их запуска на земле, во время руления, взлета и набора высоты в пределах 900 метров, а также снижения с высоты 900 м, посадки и снова руления по территории аэропорта объединяли в фазу взлетно-посадочного цикла (ВПЦ). Таким образом, географически локализованные авиационные выбросы загрязняющих веществ и парниковых газов, поступившие от гражданских самолетов в планетарный пограничный слой воздуха вблизи аэропорта и на его территории вплоть до высоты 900 м, соответствуют фазе ВПЦ. В районе аэропорта авиационные выбросы составляют около 60% валового выброса в атмосферу. Их интенсивность

[8] По терминологии ИКАО, планетарный пограничный слой до высоты 900 м (а точнее до 914 м, что соответствует 3000 футов) классифицируется как приземный слой атмосферного воздуха.

зависит от экологического совершенства авиадвигателей, интенсивности воздушного движения, системы диспетчирования самолетов в воздушном пространстве вблизи аэропорта и на земле по его территории и, наконец, от количества перевозимых пассажиров и грузов (Николайкин и др., 2004; Бурико и др., 2000). Надо отметить, что интенсивность авиационных выбросов на разных сегментах ВПЦ не является равнозначной. Так, при взлете и наборе высоты до 900 м двигатели самолета используют, как правило, 100% и 85% максимальной, располагаемой для взлета мощности (тяги) и расхода топлива. Соответственно, удельные выбросы и расход топлива у воздушного судна на этой фазе ВПЦ являются наибольшими (Бурико и др, 2000). При рулении используется малая, причем не постоянная, доля взлетной тяги, которая составляет примерно 7%. При снижении самолета, его двигатели используют около 30% максимальной тяги. Однако, несмотря на различия в интенсивности и абсолютной величине выбросов на разных сегментах ВПЦ, расчет принято производить для всего взлетно-посадочного цикла в целом.

Наименьший расход топлива и удельные выбросы происходят во время крейсерского полета на заданной высоте воздушного коридора (9 – 13 км относительно поверхности Земли), когда самолеты движутся горизонтально с оптимальной скоростью с номинальным режимом работы (нагрузкой) их двигателей (ICAO, 2010). Принимая во внимание специфику формирования, распространение и характер воздействия авиационных выбросов на верхнюю тропосферу и планетарный пограничный слой воздуха, выбросы продуктов сгорания авиатоплив было решено рассчитывать отдельно для ВПЦ, то есть до высоты 900 м, и для крейсерского полета, то есть для высот от 900 м до уровня верхней тропосферы – 9 км ... 13 км (рисунок 1).

При расчетах в планетарном пограничном слое атмосферного воздуха использовали концепцию условного взлетно-посадочного цикла, разработанную ИКАО в целях унификации анализа экологического воздействия различных типов и конструкций авиационных двигателей на различных режимах работы при выполнении воздушными судами маневров в зоне аэропорта. В ВПЦ ИКАО

обобщены все виды операций, совершенных гражданскими воздушными судами и учтены усредненные характеристики международных аэропортов различных стран мира (ICAO, 2010). Схема взлетно-посадочного цикла ИКАО приведена на рисунке 8, а общая продолжительность цикла и отдельных его сегментов – в таблице 3 (Николайкин и др., 2006; ICAO, 2010). Таким образом, взлетно-посадочный цикл по существу охватывает все географически локализованные в зоне аэропорта выбросы загрязняющих веществ и парниковых газов в планетарный пограничный слой воздуха. Помимо прочих негативных эффектов, выбросы во время ВПЦ влияют на население, проживающее вблизи авиатранспортных узлов, которым свойственна высокая интенсивность авиационного движения, о чем упоминалось в разделе 1.1.

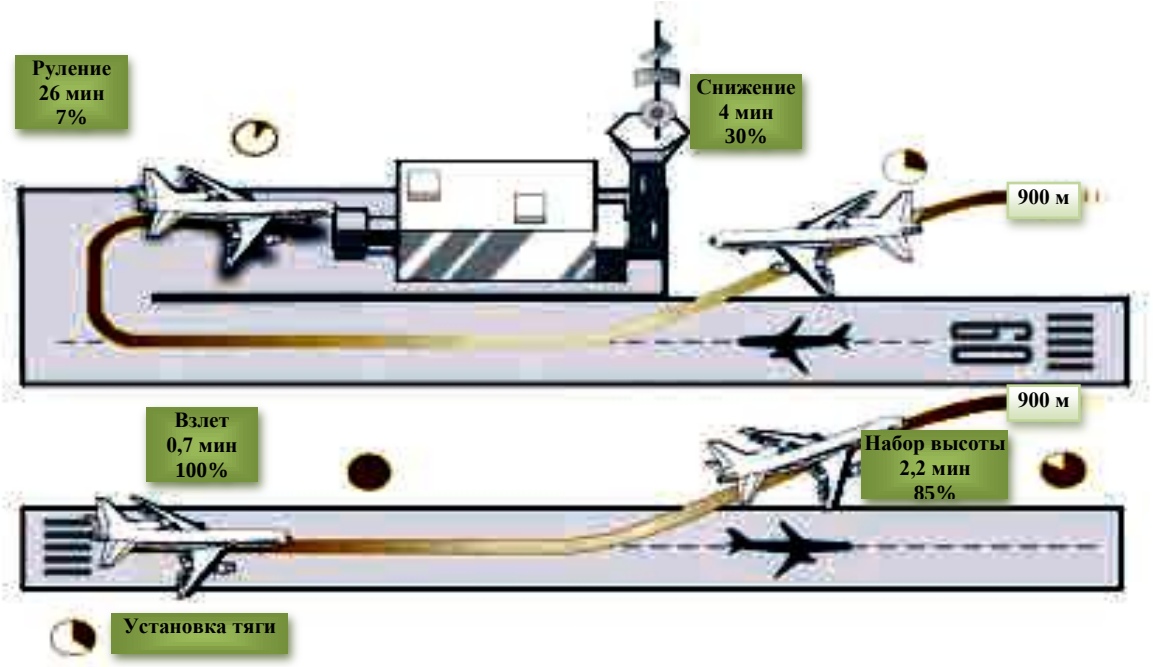

Рисунок 8 – Стандартный взлетно-посадочный цикл ИКАО с указанием продолжительности отдельных сегментов и затрачиваемой на их выполнение мощности в процентах от максимальной (ICAO, 2010)

На рисунке 9 показаны аэропорты гражданской авиации, действующие на территории Российской Федерации (по данным http://nasamoletah.ru/poznavatelno/karta-aeroportov-rossii.html). Из них 91 имеет статус федерального значения, а 74

являются межнациональными взлетно-посадочными комплексами с открытыми пунктами пропуска.

Таблица 3 – Продолжительность отдельных этапов взлетно-посадочного цикла ИКАО (по данным Николайкина и др., 2006; ICAO, 2010)

Наименование сегмента ВПЦ	**Продолжительность,**	
	Мин	**ч**
Взлет	0,7	0,012
Набор высоты	2,2	0,037
Снижение	4	0,067
Руление (земной малый газ)	26	0,433
Общая продолжительность ВПЦ	32,9	0,548

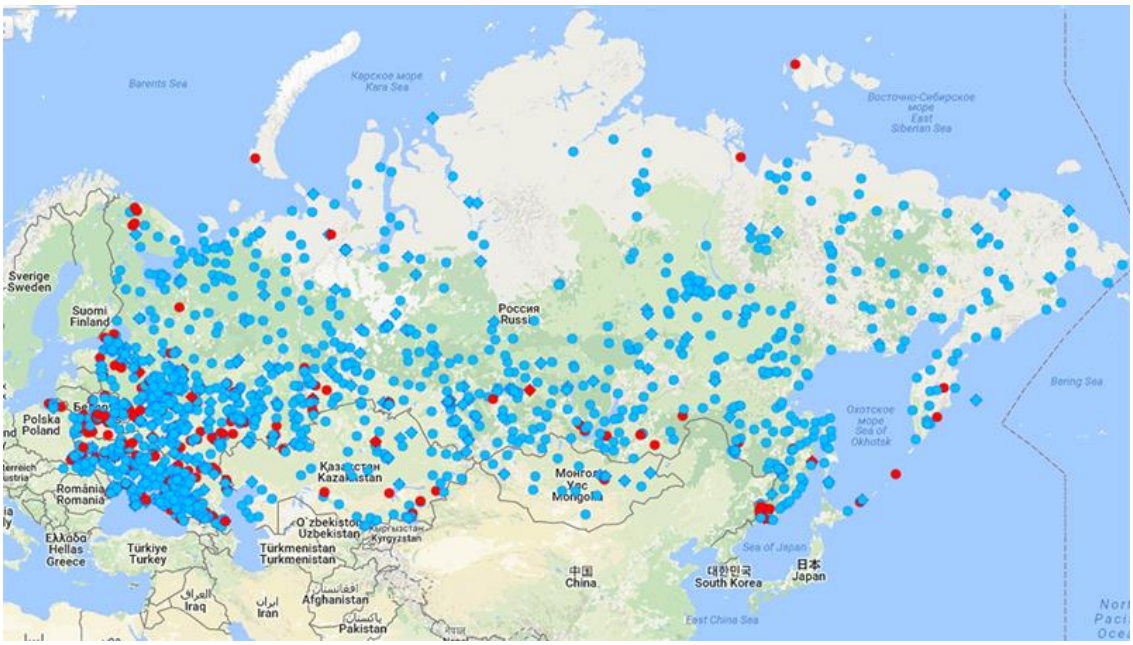

Рисунок 9 – Аэропорты гражданской авиации на территории Российской Федерации (по данным: http://nasamoletah.ru/poznavatelno/karta-aeroportov-rossii.html)

Повышенная плотность аэропортов федерального и регионального значения наблюдается в Поволжье и на юге России (Неретин, 2017). По мнению Е.С. Гинзбурга и С.А. Тархова, современное авиасообщение России имеет центростремительную организацию с замыканием большинства маршрутов на

аэропорты Московского и Санкт-Петербургского авиационных узлов, обеспечивающих почти половину общего объема авиапассажирских перевозок и значительное количество транзитных пассажиров (Гинзбург, 2009; Тархов, 2015). Кроме центра и юга ЕЧР, больше всего гражданских аэропортов в Сибири и на юге Дальнего Востока (рисунок 3). На основе такого расположения С.А. Тархов сделал вывод об ослаблении авиасвязей между европейской и азиатской частями страны (Тархов, 2015), а Е.С. Гинзбург выделил 9 макрорегиональных систем аэропортов и предложил перспективную систему совершенствования пространственной организации авиационного транспорта России, представленную на рисунке 10 (Гинзбург, 2009).

Е.С. Гинзбург, С.А. Тархов и А.С. Неретин отмечают преобладающее значение сообщения на дальние расстояния и хуже развивающиеся маршруты средней протяженности. В то же время они подчеркивают практически полное отсутствие местных перевозок, вследствие чего многие малые аэропорты не имеют регулярного воздушного сообщения (Гинзбург, 2009; Тархов, 2015; Неретин, 2017). В частности, в 2006 году 58 крупнейших российских аэропортов отправили 31,4 млн. пассажиров, при этом аэропортами московского авиаузла обслуживается почти половина общего объема перевозок пассажиров – треть пассажиров внутреннего сообщения и три четверти – международного сообщения (Гинзбург, 2009). Следует добавить, что регионы с высокой концентрацией действующих аэропортов в наибольшей степени подвержены авиационным выбросам в планетарный пограничный слой атмосферы.

Величину выброшенных в атмосферу парниковых газов и загрязняющих веществ, оказывающих косвенное воздействие на климат, определяли методом массового баланса. Его основу составляет расчет доли газообразных соединений, выделившихся в атмосферу при высокотемпературном окислении (сжигании) авиатоплива в двигателях воздушных судов. Для полного и корректного расчета авиационных выбросов необходимо учесть технические характеристики работы всех двигателей, установленных на воздушных судах, а также все режимы их эксплуатации.

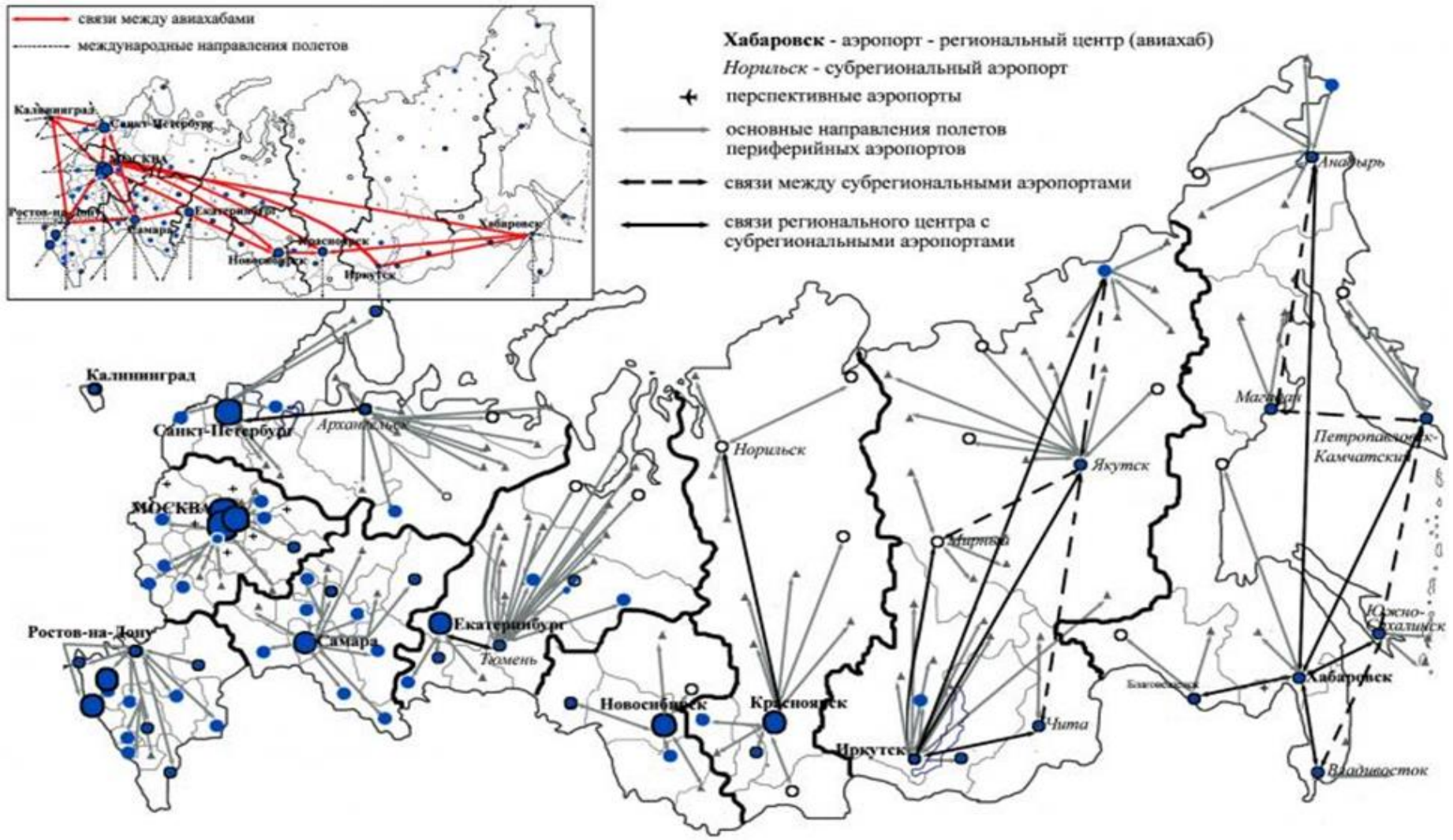

Рисунок 10 – Система совершенствования пространственной организации авиационного транспорта России Е.С. Гинзбурга (Гинзбург, 2009)

Автором диссертации были обобщены и проанализированы все доступные источники данных о количестве, типах, модификациях и технических характеристиках всех авиадвигателей, установленных на гражданских самолетах, находившихся в 2000 – 2015 гг. в эксплуатации в Российской Федерации. В анализе учитывались все модели (и модификации) гражданских воздушных судов. Для этого были собраны и изучены источники данных и информация о марках, конструкционных особенностях, технических характеристиках и количестве авиадвигателей, установленных на каждом воздушном судне, находившемся в эксплуатации в течение рассматриваемого периода (ГосНИИГА, 1991; ICAO, 1995; Николайкин и др., 2006; АТО, 2011; и др.). Также была собрана информация о коэффициентах выбросов парниковых газов и газообразных загрязняющих веществ для каждого самолета (МГЭИК, 1997; ICAO, 1995; МГЭИК, 2006; и др.).

Как показал проведенный анализ, с 2000 по 2015 гг. в воздушном пространстве Российской Федерации ежегодно эксплуатировалось более 85 моделей и модификаций гражданских воздушных судов отечественного и зарубежного производства. Все они имели разные технические характеристики и, соответственно, удельные показатели атмосферных выбросов парниковых газов и газообразных загрязняющих веществ. При этом интенсивность эксплуатации отдельных воздушных судов в разные годы сильно варьировала. Алгоритм расчета выбросов разработан с учетом различных характеристик и режимов работы авиадвигателей на отдельных этапах полетного цикла (ВПЦ и крейсерский полет). Кроме того, в расчетах учитывали общую продолжительность эксплуатации воздушного судна (годовой налет) и общее количество выполненных за год каждым воздушным судном взлетов и посадок (число совершенных ВПЦ).

Сведения о годовых величинах налета и количестве взлетно-посадочных циклов для каждой модели (и модификации) гражданских воздушных судов за период 2000 – 2015 гг. были взяты из данных, используемых для подготовки Национальных докладов о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом (Российская Федерация, 2017).

Состав и объем выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов, а также характер и масштаб их воздействия на атмосферу зависят от используемого авиационного топлива. На турбореактивных и турбовинтовых двигателях, устанавливаемых на дозвуковых гражданских воздушных судах, в качестве топлива используются авиационные керосины марок ТС-1, Т-6, РТ, а также их зарубежные аналоги (Яновский и др., 2000; Яновский и др., 2002; Яновский и др., 2004; Харин и др., 2002). В статистической отчетности топливо, использованное турбореактивными и турбовинтовыми авиадвигателями, дается без детализации по использованным маркам. Но выбрасываемые в атмосферу продукты сгорания авиационных керосинов разных марок, как правило, практически не отличаются по компонентному составу. Поэтому при расчете выбросов детализацию по отдельным маркам авиатоплив можно не учитывать.

В авиационных поршневых двигателях, устанавливаемых на самолетах малой авиации, применяются авиационные бензины Б-70, Б-91/115, Б-95/130, Б-100/130 и СБ-78 (Яновский и др., 2000; Яновский и др., 2002; Яновский и др., 2004). Анализ использования авиапарка гражданских воздушных судов показал, что в период с 2000 по 2015 гг. в воздушном пространстве Российской Федерации авиационная работа выполнялась преимущественно дозвуковыми гражданскими самолетами с турбореактивными и турбовинтовыми двигателями, основным видом топлива которых был авиационный керосин. Воздушные суда малой авиации на авиационных поршневых двигателях использовались очень ограниченно, и их вкладом в выбросы можно пренебречь.

Важно отметить, что интенсивность эксплуатации, то есть количество циклов взлета и посадки, а также общий налет, каждого типа и модификации воздушного судна год от года различались, что было учтено при разработке алгоритма расчета. Соответственно, расчеты годовых выбросов для каждого типа и модификации судна выполнялись отдельно на основе собранных автором данных о количестве, марке и технических характеристиках установленных на конкретных воздушных судах авиационных двигателей и показателях их выбросов в атмосферу. Таким образом, вычисления осуществлялись для каждого

типа (модификации) воздушного судна и каждого года рассматриваемого периода, причем отдельно по фазам полета, характеризующимся специальными режимами эксплуатации авиадвигателей, то есть для фаз ВПЦ и крейсерского полета. Выбросы приоритетных парниковых газов и газообразных загрязняющих веществ, а также их совокупное влияние на климат вычисляли с допущением полного окисления в атмосфере всех рассматриваемых газообразных веществ. Расчеты реализованы в пакете программ *MS Excel*. Атмосферную эмиссию парниковых газов (CO_2, CH_4 и N_2O) на фазе ВПЦ рассчитывали по формуле (1), а на фазе крейсерского полета – по формуле (2):

$$E_{LTO} = \sum_{x=1}^{m} (N_{LTO_x} \times EF_{LTO_x}) \quad (1)$$

$$E_{GHG} = \sum_{x=1}^{m} (FC_{x_t} \times CF_{NCV} \times EF_{GHG}) \quad (2)$$

где E_{LTO} – годовой выброс от взлетно-посадочных циклов, (т);

N_{LTOx} – число взлетно-посадочных циклов воздушного судна *x* за год *t* (шт.);

EF_{LTO_x} – коэффициент эмиссии для режима ВПЦ воздушного судна *x* (т ВПЦ$^{-1}$);

E_{GHG} – годовая эмиссия парникового газа во время крейсерского полета, (т);

FC_{x_t} – масса топлива, использованного гражданским воздушным судном *x* в году *t* во время крейсерского полета (т);

CF_{NCV} – коэффициент пересчета в теплоту сгорания авиатоплива (ТДж т$^{-1}$);

EF_{GHG} – коэффициент эмиссии парникового газа на крейсерском полете (т ТДж$^{-1}$).

Выбросы парниковых газов во время цикла взлета и посадки по формуле (1) рассчитывали при помощи удельных коэффициентов выбросов EF_{LTOx}, которые

были взяты из Руководящих принципов МГЭИК (МГЭИК, 1997; МГЭИК, 2006). Данные о числе ВПЦ, выполненных каждым воздушным судном за год, были взяты из материалов, используемых для подготовки национальных кадастров парниковых газов (Российская Федерация, 2017). Значения удельных коэффициентов выбросов EF_{LTOx} и EF_{GHG} были получены автором из Руководящих принципов МГЭИК, Базы данных ИКАО, а также справочной литературы (МГЭИК, 1997; АТО, 2011; ICAO, 1995). Их значения, использованные в расчетах, приведены в таблице 1 Приложения.

При выполнении расчетов по формуле (1) не предусматривается использование данных о потреблении топлива на фазе взлетно-посадочного цикла. Однако данные о потреблении топлива нужны для расчета выбросов во время крейсерского полета воздушного судна по формуле (2). Для оценки выбросов парниковых газов на крейсерском полете определяли массу топлива, израсходованную гражданским воздушным судном во время крейсерского полета.

При осуществлении гражданских воздушных перевозок раздельный учет расхода топлива на сегментах взлетно-посадочного цикла и крейсерского полета не ведется. Технические характеристики большинства авиадвигателей, устанавливаемых на гражданских самолетах, включают показатель среднечасового расхода авиатоплива, в котором учитывается его потребление во время взлета, крейсерского полета, посадки и наземного руления в аэропорту. Величины среднечасового расхода топлива отдельных типов воздушных судов приведены в Базе данных ИКАО, Руководящих принципах МГЭИК, данных Транспортной клиринговой палаты и другой справочной и специализированной литературе (МГЭИК, 1997; ГосНИИГА, 1991; ICAO, 1995; Николайкин и др., 2006; АТО, 2011; и др.). Эти данные были собраны и изучены автором. Из них были выбраны показатели, соответствующие авиадвигателям, установленным на гражданских самолетах, эксплуатировавшихся в грузопассажирских перевозках в воздушном пространстве России с 2000 по 2015 гг. включительно. С использованием выбранных показателей автором произведены расчеты общего годового потребления авиатоплива и его потребления на сегментах ВПЦ. Расчеты

производили по формуле (3) отдельно для каждой модели и модификации самолетов, находившихся в эксплуатации, и за каждый год с 2000 по 2015 гг. включительно. Потребление авиатоплива воздушным судном на фазе цикла взлета – посадки рассчитывали по продолжительности ВПЦ и данным о среднечасовом расходе авиатоплива, установленным для каждого воздушного судна (ГосНИИГА, 1991; ICAO, 1995; МГЭИК, 1997; Грабар и др., 2009; АТО, 2011). Общая продолжительность стандартного взлетно-посадочного цикла ИКАО, включающего руление (земной малый газ), взлет, набор высоты и заход на посадку (Николайкин и др., 2006; ICAO, 2010), была принята равной 0,548 ч (таблица 3).

Массу годового потребления авиатоплива определяли по его среднечасовому расходу и годовому налету, взятому из национального кадастра парниковых газов (Грабар и др., 2009; Российская Федерация, 2017). Годовое потребление авиатоплива воздушным судном на крейсерском полете определяли как разность между общей массой годового потребления авиационного топлива и его расходом в режиме взлетно-посадочного цикла, формула (4):

$$FC_x(t) = FT_x(t) \times FR_x, \quad (3)$$

$$FC_{x_t} = FC_x(t) - FC_{LTO}, \quad (4)$$

где $FC_x(t)$ – общее потребление авиатоплива воздушным судном *x* в году *t* (т);

$FT_x(t)$ – годовой налет гражданского воздушного судна *x* в году *t* (самолето-часов);

FR_x – среднечасовой расход авиатоплива воздушным судном *x* (т $ч^{-1}$);

FC_{x_t} – масса авиационного топлива, использованного воздушным судном *x* в году *t* во время крейсерского полета (т);

FC_{LTO} - расход авиатоплива воздушным судном в режиме ВПЦ (т).

Расчеты по формуле (4) производили для каждой находившейся в эксплуатации модели (и модификации) воздушного судна и за каждый год с 2000 по 2015 гг. включительно. Полученные величины массы авиационного топлива, израсходованного во время крейсерского полета (FC_{x_t}), подставляли в формулу (2), и получали значения массы выбросов парниковых газов для крейсерского полета воздушных судов. Расчеты по формуле (2) также производили отдельно для каждого находившегося в эксплуатации воздушного судна и ежегодно за период с 2000 по 2015 гг. включительно.

Загрязнение атмосферы приоритетными газообразными веществами SO_2, CO, NO_x и C_nH_m оценивалось расчетным методом по их удельным выбросам от одного авиационного двигателя в зависимости от его нагрузки на фазах взлетно-посадочного цикла и крейсерского полета. Массу SO_2, CO, C_nH_m и NO_x, образовавшихся в одном авиадвигателе и затем поступивших в атмосферу в составе продуктов сгорания авиатоплива за взлетно-посадочный цикл, рассчитывали как сумму выбросов, произведенных во время отдельных этапов работы по формуле (5):

$$M_k = \sum El_i \times G_{Ti} \times \tau_i \times 10^{-3} \qquad (5)$$

где M_k – масса атмосферного выброса загрязняющего вещества SO_2, CO, C_nH_m или NO_x авиадвигателем марки k, выполненная за взлетно-посадочный цикл (т);

EI_i - удельный показатель выброса рассматриваемого загрязняющего вещества в i-м режиме работы двигателя марки k (кг/т);

G_{Ti} - расход топлива в i-м режиме работы двигателя (т • $ч^{-1}$);

τ_i - продолжительность i-го режима работы двигателя (ч);

i - режим работы двигателя на земле с момента его запуска в аэропорту и на высоте до 900 м (сегмент ВПЦ).

Удельный показатель выброса (El_i) равен массе загрязняющего вещества, образовавшегося при сжигании авиадвигателем единицы количества топлива и

затем выброшенного в атмосферу. Он определяется экспериментально для каждого загрязняющего вещества и каждого типа авиадвигателя по принятой ИКАО методике при заданных характеристиках топлива и определенных атмосферных условиях. Определение El_i производится для стандартного взлетно-посадочного цикла ИКАО, включающего отдельные режимы нагрузки авиадвигателя с момента его запуска на земле, руления перед взлетом, взлета и до подъема на высоту 900 м, а также во время снижения с высоты 900 м до посадки, руления и, наконец, полного выключения (ICAO, 2010). Величина El_i зависит от термодинамического совершенства авиадвигателя и состояния его камеры сгорания, качества и расхода авиатоплива, а также аэродинамических качеств воздушных судов. Величины El_i для включенных в расчеты загрязняющих веществ с детализацией по каждому сертифицированному авиадвигателю, а также информация об использовании авиадвигателей на гражданских самолетах были взяты автором из базы данных ИКАО, материалов Транспортной клиринговой палаты, справочных данных и специализированной литературы (ICAO, 1995; МГЭИК, 1997; АТО, 2011; и др.). Использованные в расчетах значения удельных показателей выброса (El_i) и расход топлива в *i*-м режиме работы двигателя (G_{Ti},) приведены в таблицах 2 и 3 Приложения. Величины временной продолжительности *i*-го режима работы двигателя основаны на данных взлетно-посадочного цикла ИКАО (таблица 3).

Масса загрязняющих веществ, выброшенных в атмосферу за год воздушным судном *x,* при выполнении всех взлетно-посадочных циклов зависит от типа и количества установленных на нем авиационных двигателей. Поэтому годовой выброс загрязняющего вещества воздушным судном *x* ($M_{x/\text{год}}$) от всех взлетно-посадочных циклов определяли по формуле (6):

$$M_{x/\text{год}} = n \times N \times M_k \qquad (6),$$

где $M_{x/\text{год}}$ – масса годового выброса загрязняющего вещества воздушным судном *x*, (т);

n – число авиадвигателей, установленных на воздушном судне *x* (шт.);

N – число взлетно-посадочных циклов, совершенных воздушным судном x (шт.);

M_k – масса атмосферного выброса загрязняющего вещества SO_2, CO, C_nH_m или NO_x авиадвигателем марки k, выполненная за взлетно-посадочный цикл (т).

Масса загрязняющего вещества, образовавшегося в авиадвигателе марки k гражданского воздушного судна x и затем поступившего в атмосферу из авиадвигателя k гражданского воздушного судна x во время крейсерских полетов, выполненных воздушным судном в течение года, определялась по формуле (7):

$$M_{\text{кр}x} = n \times El_{\text{кр}} \times G_{\text{кр}} \times \tau_{\text{кр}x} \qquad (7)$$

где $M_{\text{крх}}$ – масса загрязняющего вещества, выброшенного за год воздушным судном x (т),

n – число авиадвигателей марки k, установленных на воздушном судне x (шт.);

$EI_{\text{кр}}$– удельный показатель выброса загрязняющего вещества авиадвигателем марки k во время крейсерского полета в расчете на единицу потребленного авиатоплива (т т$^{-1}$);

$G_{\text{кр}}$- номинальный (нормативный) расход авиатоплива на крейсерском полете (т ч$^{-1}$);

$\tau_{\text{кр}x}$ – годовая продолжительность крейсерского полета, выполненного гражданским воздушным судном x (ч).

Как и удельный показатель выброса загрязняющих веществ на отдельных режимах взлетно-посадочного цикла, удельный показатель выброса во время крейсерского полета ($EI_{кр}$) определяется экспериментально для каждого авиадвигателя в режиме работы с номинальной (нормативной) нагрузкой (Николайкин и др, 2006). Значения удельных показателей выброса загрязняющих веществ авиадвигателями отдельных марок и их модификациями, а также данные об

использовании авиадвигателей на гражданских самолетах были получены автором из Базы данных ИКАО и других справочных источников (ICAO, 1995; МГЭИК, 1997; АТО, 2011; и др.). Они приведены в таблице 4 Приложения. Таким образом, в разработанном алгоритме оценки выбросов загрязняющих веществ использованы средние показатели удельного образования и выброса загрязняющих веществ в атмосферу, а также осредненные показатели режимов работы двигателей.

Годовую продолжительность крейсерского полета ($\tau_{кр}$) каждого гражданского самолета *x* определяли как разность между общим годовым налетом и суммарной годовой продолжительностью выполненных самолетом взлетно-посадочных циклов. Для определения годовой продолжительности ВПЦ, как и в случае расчета выбросов парниковых газов, использовали стандартный взлетно-посадочный цикл ИКАО продолжительностью 0,548 ч из таблицы 3 (Николайкин и др., 2006; ICAO, 2010), а также общее количество циклов, выполненных гражданским самолетом *x* за каждый год из рассматриваемого диапазона лет (2000 – 2015 гг.). Произведение этих двух величин давало искомую годовую продолжительность ВПЦ. Данные о налете и количестве ВПЦ для каждого воздушного судна, находившегося в эксплуатации в конкретном году, брали из материалов национального кадастра парниковых газов (Российская Федерация, 2017).

Суммированием рассчитанных масс выбросов рассматриваемых загрязняющих веществ (SO2, CO, CnHm и NOx), см. формулу (6), за все выполненные взлетно-посадочные циклы (Мх/год) и за весь период крейсерских полетов (Мкрх), см. формулу (7), получается общая масса годового выброса газообразного загрязняющего вещества гражданским воздушным судном х. В свою очередь, сложением годовых выбросов всех гражданских воздушных судов, находившихся в эксплуатации в воздушном пространстве Российской Федерации, определялся общий годовой выброс в атмосферу за каждый год временного диапазона с 2000 по 2015 гг. включительно. Для некоторых современных российских гражданских самолетов фактические характеристики удельных нормативных выбросов пока недостаточно изучены. В случае недоступности данных об удельных нормативных выбросах для отдельных воздушных судов, применяли метод аналогий на основе данных их прототипов.

Как уже упоминалось выше, под воздействием на климат в настоящей работе подразумеваются эффекты, вызванные приоритетными парниковыми газами и газообразными загрязняющими веществами с косвенным воздействием на климат, которые поступили в атмосферу с авиационными выбросами. Разные парниковые газы и газообразные загрязняющие вещества имеют различное время нахождения (жизни) в атмосфере, то есть период, в течение которого они полностью выводятся из нее в результате химических и фотохимических превращений и поступают на подстилающую поверхность с осадками, либо в виде сухих выпадений. Кроме того, в силу своих физико-химических свойств, эти газообразные соединения оказывают неравнозначное воздействие на окружающую среду и климатическую систему.

Для характеристики степени воздействия на климатическую систему применяется понятие потенциала глобального потепления. Потенциал глобального потепления (ПГП) представляет собой коэффициент, устанавливающий степень радиационного воздействия единицы массы загрязняющего вещества или парникового газа относительно единицы массы диоксида углерода в течение определенного периода времени (Climate Change 1994, 1995). Потенциалы глобального потепления позволяют сравнивать комплексное радиационное воздействие за заданный период (например, 100 лет) различных по химическому составу и физико-химическим свойствам газообразных соединений – парниковых газов и загрязняющих веществ. Кроме того, применение потенциалов глобального потепления позволяет оценить совокупный эффект нескольких газообразных загрязняющих веществ, одновременно присутствующих в атмосферном воздухе.

Парадигма применения потенциалов глобального потепления разработана международным научным сообществом и подробно рассмотрена в докладах об оценке МГЭИК. В этих же докладах приводятся условия и порядок применения разработанных значений ПГП (Climate Change 1995; МГЭИК, 2007; Climate Change, 2013; и др.). Надо признать, что концепция потенциалов глобального потепления имеет определенные недостатки, особенно в части оценки влияния на

атмосферу короткоживущих газообразных парниковых газов и загрязняющих веществ (МГЭИК, 2007; Climate Change, 2013). Однако эффективной альтернативы потенциалам глобального потепления пока еще не предложено и, следовательно, потенциалы глобального потепления являются единственно приемлемой, на сегодняшнее время, метрикой сравнения атмосферного воздействия отдельных парниковых газов и газообразных загрязняющих веществ и, соответственно, должны быть использованы для количественной оценки влияния, оказываемого ими на климатическую систему. Значения использованных в расчетах потенциалов глобального потепления парниковых газов и газообразных загрязняющих веществ, оказывающих косвенное воздействие на климат, продолжительность их пребывания в атмосфере представлены в таблице 4, составленной автором на основе обобщения материалов МГЭИК и других данных литературы (МГЭИК, 2007; Chulkyu Lee et al., 2011; Climate Change 1995 и др.).

Таблица 4 – Потенциалы глобального потепления, характеризующие воздействие на атмосферу и климатическую систему парниковых газов и газообразных загрязняющих веществ по данным (составлена автором по данным МГЭИК, 2007; Chulkyu Lee et al., 2011; Climate Change 1995; Lee et al., 2009; Myhre et al., 2013 и др.)

Химическое вещество	**Значение потенциала глобального потепления, CO_2-экв.**	**Средняя продолжительность нахождения в атмосфере**
CO_2	1*	~50-200 лет
CH_4	25*	~10 лет
N_2O	298*	~109 - 123 лет
SO_2	–38.4**	~13 – 78 часов
NO_x	–10.8**	~несколько часов – 2 недели
CO	1.9**	~1-3 месяца
* Данные Четвертого доклада МГЭИК об оценке (МГЭИК, 2007) **Справочные данные к Пятому докладу МГЭИК об оценке (Myhre et al., 2013)		

Приведенные в таблице значения потенциалов глобального потепления определены с учетом допущения, что средняя продолжительность пребывания в атмосфере рассматриваемых газообразных веществ составляет 100 лет. Это допущение сделано для унификации воздействий, оказываемых разными веществами (МГЭИК, 2007; Chulkyu Lee et al., 2011; Climate Change 1995; Lee et al., 2009; Myhre et al., 2013 и др.). Положительные значения потенциала глобального потепления в таблице 4 указывают на усиление парникового эффекта, то есть нагрев атмосферы, благодаря присутствию в ней рассматриваемого газообразного вещества. В свою очередь, отрицательные значения свидетельствуют об охлаждении, которое вызывают газообразные вещества путем увеличения альбедо атмосферы, либо отъема тепла (выхолаживания) в процессе химических трансформаций.

Следует также отметить, что значения потенциалов глобального потепления определены далеко не для всех газообразных загрязняющих веществ. В частности, они пока не установлены для углеводородов, содержащихся в струе выбросов авиационных двигателей, а также тропосферного озона, несмотря на их очевидное положительное радиационное воздействие. Не определен потенциал глобального потепления и для водяного пара. Отсутствие величин потенциалов глобального потепления вышеозначенных газообразных соединений делает невозможным оценку их вклада в воздействие на климат.

Используя потенциалы глобального потепления из таблицы 4, автор выполнила оценку воздействия на климатическую систему парниковых газов и газообразных загрязняющих веществ, оказывающих косвенное воздействие на климат. Содержащиеся в авиационных выбросах газообразные загрязняющие вещества и парниковые газы поступают в атмосферный воздух одновременно и, следовательно, могут усиливать или ослаблять друг друга. Для характеристики степени воздействия на климатическую систему загрязняющих веществ и парниковых газов, одновременно поступивших в атмосферу с авиационными выбросами, в диссертации использовалось понятие совокупного воздействия. Применительно к цели работы это означает, что действие на климат газообразных

загрязняющих веществ и парниковых газов рассматривается совместно. Предлагаемый подход к оценке совместного воздействия приоритетных парниковых газов CO_2, N_2O, CH_4 и загрязняющих веществ CO, NO_x, SO_2 заключаются в пересчете величин их авиационных выбросов в эквивалент диоксида углерода (CO_2-экв.), на основе единых метрик, приведенных в таблице 4, после чего становится возможным суммирование производимых ими эффектов. Соответственно, совместное воздействие на климатическую систему определялось суммированием выраженных в эквиваленте CO_2 расчетных значений масс выбросов приоритетных парниковых газов и газообразных загрязняющих веществ по каждому этапу полета для каждого типа воздушного судна в пределах календарного года его эксплуатации. Таким образом, при помощи разработанного алгоритма расчета можно оценить суммарные годовые авиационные выбросы в атмосферу в пределах территории России. Полученные расчетные оценки могут быть использованы для мониторинга влияния российского гражданского авиапарка на окружающую среду и климат.

Выводы по главе 2

По итогам 2 главы можно сделать следующие выводы:

• Выбросы в планетарный пограничный слой происходят во время взлета и посадки гражданских воздушных судов и, преимущественно, локализованы в зоне аэропортов. Выбросы в верхнюю тропосферу происходят во время крейсерского полета, и не являются локальными. Они существенно распределены в верхней тропосфере, так как воздушные трассы пролегают практически над всеми участками суши территории Российской Федерации и, кроме того, в тропосфере происходит трансграничный и дальний перенос продуктов авиационных выбросов. Соответственно прямое и косвенное воздействие на окружающую среду и климат оказывается и в точке выброса, и повсеместно за счет интенсивного перемешивания и дальнего переноса продуктов выбросов в

атмосфере. При этом последствия выбросов различны в планетарном пограничном слое и в верхней тропосфере.

• Воздействие на окружающую среду и климат приоритетных парниковых газов и газообразных загрязняющих веществ с косвенным воздействием на климат прямо зависит от массы их выбросов в атмосферу во время работы авиационных двигателей гражданских воздушных судов. В диссертации разработаны инновационные методы и алгоритмы расчета авиационных выбросов парниковых газов и загрязняющих веществ, оказывающих косвенное воздействие на климат. Они основаны на технических характеристиках и авиационной работе, выполненной эксплуатируемыми в России судами гражданской авиации, и позволяют выполнить оценки суммарных годовых выбросов.

• Масса поступивших в атмосферный воздух парниковых газов и загрязняющих веществ рассчитывается по данным о сожженном воздушными судами топливе и параметрам его пересчета в выбросы, полученным на основе анализа национальной и международной справочной литературы. Из-за различного характера воздействия авиационных выбросов на окружающую среду и климат на разных высотах, расчеты производятся отдельно для фаз взлетно-посадочного цикла (до высоты 900 м) и крейсерского полета (воздушные коридоры на высотах от 900 м до 9 ... 13 км).

• Анализ гражданского авиационного парка России свидетельствует о его неоднородности. С 2000 по 2015 гг. в нем было в обще сложности более 85 типов и модификаций гражданских воздушных судов, причем интенсивность их эксплуатации в разные годы сильно варьировала. Соответственно оценку авиационных выбросов в воздушное пространство Российской Федерации необходимо выполнять отдельно для каждого календарного года с учетом числа, типов и модификаций гражданских самолетов, находившихся в этот период в эксплуатации.

• Разработан алгоритм оценки совместного воздействия атмосферных выбросов приоритетных газообразных загрязняющих веществ и парниковых газов на основе пересчета величин их авиационных выбросов в эквивалент диоксида

углерода (CO_2-экв.) с использованием потенциалов глобального потепления МГЭИК. Влияние газообразных загрязнителей и парниковых газов оценивается на основе суммирования выраженных в эквиваленте CO_2 расчетных значений выбросов по каждому этапу полета для каждого типа воздушного судна в пределах календарного года его эксплуатации. При помощи разработанного алгоритма расчета можно оценить суммарные годовые авиационные выбросы в атмосферу в пределах территории России. Полученные расчетные оценки могут быть использованы для мониторинга влияния российского гражданского авиапарка на окружающую среду и климат.

ГЛАВА 3 ВОЗДЕЙСТВИЕ ГАЗООБРАЗНЫХ АВИАЦИОННЫХ ВЫБРОСОВ НА АТМОСФЕРУ И ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

3.1 Динамика авиационной работы гражданских воздушных судов

Анализ данных об эксплуатации гражданских воздушных судов, используемых при подготовке национального кадастра парниковых газов (Российская Федерация, 2017), показал, что в Российской Федерации с 2000 по 2015 гг. наблюдался поступательный рост интенсивности внутренних воздушных перевозок. На рисунке 11 приведены данные налета во внутреннем воздушном сообщении, выполненного гражданскими самолетами российского и иностранного производства, а на рисунке 12 – данные по количеству эксплуатируемых в период 2000-2015 гг. воздушных судов. Выполненные автором оценки показывают, что в первые шестнадцать лет 21 века наблюдался значительный рост интенсивности эксплуатации гражданских воздушных судов российского авиапарка, причем его неоднородность отразилась и в интенсивности эксплуатации отдельных типов и модификаций самолетов в отдельные календарные годы. Так, с 2000 по 2015 гг. общее число часов налета во внутреннем сообщении увеличилось на 57%.

На фоне общего роста суммарного налета с 2008 г. заметно увеличилась доля перевозок, выполняемых самолетами зарубежного производства, а также, начиная с 2008 г., количество эксплуатируемых воздушных судов зарубежного производства при том, что количество самолетов российского производства практически не менялось. Доля самолетов иностранного производства в общем налете российского воздушного транспорта на внутренних авиалиниях выросла с 2% в 2000 году до 69% в 2015 году (рисунки 11 и 12). Рост доли судов зарубежного производства обусловлен сочетанием экономических и технологических факторов, в числе которых конкурентные преимущества, представляемые системой лизинга, а также выработка ресурса и технологическое старение отечественных воздушных судов.

Рисунок 11 – Налет во внутреннем сообщении в Российской Федерации, выполненный воздушными судами российского и зарубежного производства

Рисунок 12 – Число воздушных судов российского и зарубежного производства, используемых в Российской Федерации за первые 15 лет 21-го века

Кроме того, автором был проведен анализ общей численности взлетно-посадочных циклов, выполненных за рассматриваемый период. Общее число взлетов и посадок, совершенных гражданскими воздушными судами, приведено на рисунке 13. Из рисунка видно, что с 2000 года их количество ежегодно росло вплоть до 2008 г., когда их число было на 42% выше, чем в 2000 году. Однако после 2008 г. наблюдается резкий спад интенсивности гражданских перевозок, который продолжился вплоть до 2010 г. За этот период число взлетно-посадочных циклов сократилось на 51% по сравнению с их величиной в 2008 году. После 2010 г. количество ВПЦ снова начало расти, и в 2015 году их число было на 9% выше, чем в 2000 году, однако уровень 2008 г. достигнут так и не был. Судя по количеству совершенных взлетно-посадочных циклов, начиная с 2005 года, доля воздушных судов зарубежного производства в авиапарке российских авиаперевозчиков стала расти на фоне сокращения авиатранспортной работы, выполняемой судами российского производства. В 2015 году доля ВПЦ, совершенных судами отечественного производства, составила примерно 30% общего их числа, тогда как этот же показатель в 2000 г. составил 96%. По всей вероятности, снижение числа циклов взлетов и посадок с 2008 по 2010 гг. обусловлено рядом взаимосвязанных причин: кризисными явлениями в российской экономике, ростом цен на топливо и связанным с ним существенным, по сравнению с ростом доходов населения, повышением тарифов на перевозки (Гинзбург, 2009). В конце 2008 г. на темпах роста пассажиро- и грузооборота стали сказываться последствия глобального экономического кризиса, активизация грузопассажирских авиаперевозок в России и, наконец, внедрение современных средне- и дальнемагистральных воздушных судов, позволивших сократить необходимость промежуточных посадок для дозаправки.

В 2009 г. началась реализация Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года, в рамках которой была произведена оптимизация воздушно-транспортного движения, включая увеличение количества полетов, выполняемых дальнемагистральными гражданскими самолетами, и соответствующее уменьшение количества взлетно-посадочных циклов. Кроме того, рост интенсивности эксплуатации судов зарубежного производства является

следствием обновления авиационного парка, предпринятого российскими авиакомпаниями в первые пятнадцать лет 21 века.

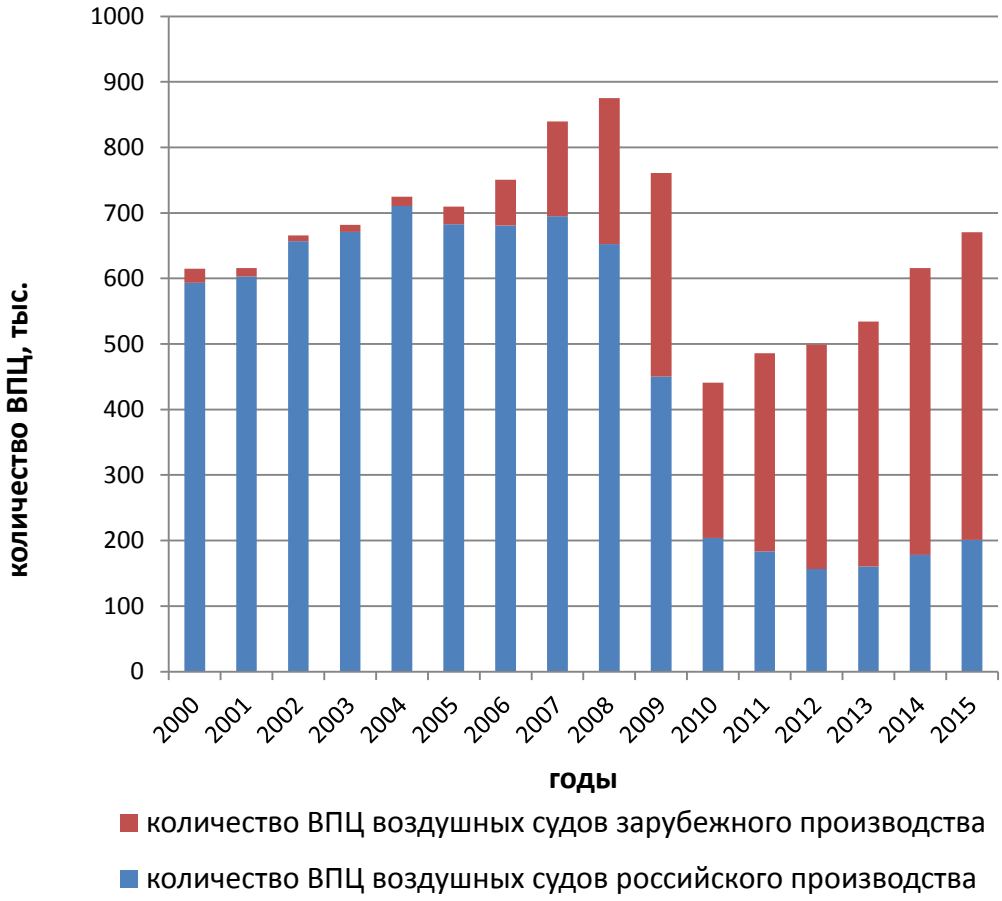

Рисунок 13 – Динамика взлетно-посадочных циклов воздушных судов российского и зарубежного производства за период 2000–2015 гг.

Таким образом, результаты расчета показывают, что за первые 16 лет 21 в. общий налет во внутреннем сообщении увеличился на 57%, а количество взлетно-посадочных циклов на 9%. Несмотря на заметное увеличение общего объема авиаперевозок, обновление парка воздушных судов и оптимизация воздушно-транспортного движения способствовали сдерживанию авиационных выбросов в планетарный пограничный слой. Следствием этого является снижение негативного воздействия гражданских самолетов в зоне географической локализации гражданских аэропортов.

3.2 Выбросы парниковых газов в воздушное пространство России

Поскольку парниковые газы не являются загрязняющими веществами, действенных мер контроля и ограничения их антропогенных выбросов практически не предпринималось до 1990 года, когда МГЭИК опубликовала доклад об оценке, в котором впервые была засвидетельствована реальная угроза изменения климата. Выводы МГЭИК легли в основу Резолюции № 45/112 Генеральной Ассамблеи ООН, с которой начались международные переговоры, закончившиеся разработкой и принятием рамочной Конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН).

С самого начала Российская Федерация активно участвует в выполнении положений РКИК ООН и Киотского протокола к ней. Ратифицировав РКИК ООН в 1994 году и Киотский протокол в 2004 году, Россия приняла и выполнила обязательства снизить антропогенные выбросы парниковых газов до уровня 1990 года и сохранять их на этом уровне в течение первого периода действия Протокола с 2008 по 2012 гг. (Киотский протокол, 2005; Технический доклад Секретариата РКИК ООН, 2007). Для информирования о выполнении принятых обязательств Россия ежегодно представляет в органы РКИК ООН национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, который готовится на основе методологии МГЭИК (МГЭИК, 2006; Технический доклад Секретариата РКИК ООН, 2007). В национальный кадастр входят расчеты выбросов парниковых газов для всех секторов экономики и видов хозяйственно-экономической деятельности, в том числе гражданского воздушного сообщения. Информация о выбросах подается для различных категорий источников, включая международные авиационные и морские перевозки. Следует отметить, что данные об эмиссии от международных авиационных и морских перевозок, а также сжигания биомассы не включаются в общие объемы национальных выбросов, а представляются в качестве справочной информации. При этом в документах РКИК ООН говорится, что ограничение или сокращение выбросов парниковых газов от международных авиаперевозок должно производиться под эгидой ИКАО (Киотский протокол, 2005).

ИКАО, являющаяся специализированным учреждением Организации Объединенных Наций, была создана в результате подписания в Чикаго 7 декабря 1944 года Конвенции о международной гражданской авиации. Уставной целью ИКАО является обеспечение безопасного, упорядоченного развития международной гражданской авиации во всем мире. ИКАО устанавливает международные стандарты и правила, необходимые для обеспечения безопасности полетов, эффективности и регулярности воздушных перевозок, а также охраны окружающей среды от воздействия авиации. Техническим комитетом Совета ИКАО является Комитет по охране окружающей среды от воздействия авиации (CAEP), отвечающий за проведение конкретных исследований, связанных с нормированием и снижением воздействия авиационного шума и эмиссии вредных веществ на окружающую среду. В рамках CAEP ИКАО проводит деятельность по ограничению или уменьшению объема авиационной эмиссии на локальном и глобальном уровнях за счет реализации мер технического, эксплуатационного и рыночного характера.

Несмотря на то, что ИКАО обладает прецедентным правом разработки и принятия решений о снижении выбросов парниковых газов от международных авиаперевозок, для количественной оценки этих выбросов используются методологии МГЭИК (МГЭИК, 2006; МГЭИК, 2000; IPCC, 1997). По методологии МГЭИК сбор информации о потреблении топлива для внутренних и международных перевозок предлагается осуществлять на основе анализа авиационной работы (МГЭИК, 2006), что согласуется с разработанным автором алгоритмом расчета авиационных выбросов.

В 1999 г. был опубликован специальный доклад МГЭИК «Авиация и глобальная атмосфера», в котором обобщены результаты исследований влияния газов и частиц из состава выбросов авиадвигателей на изменение химического состава атмосферы (IPCC, 1999). В нем указано на потенциальную опасность неизбежного увеличения конденсационных следов из-за роста интенсивности воздушного сообщения, а также связанное с этим формирование на больших

высотах долгоживущих перистых облаков. Эти процессы способны нарушить термодинамический баланс в атмосфере (IPCC, 1999).

Результаты расчета выбросов парниковых газов диоксида углерода, оксида диазота и метана в результате сжигания топлива авиадвигателями воздушных судов за период с 2000 по 2015 гг., выполненные по разработанным в предыдущей главе алгоритмам, представлены на рисунках 14 – 16. На рисунках показана динамика годовых выбросов при выполнении взлетно-посадочного цикла, крейсерского полета, а также суммарные их величины. Как уже упоминалось ранее, в расчетах не учтены внутренние сегменты международных авиарейсов и транзитные пролеты над территорией страны, осуществляемые российскими и зарубежными авиаперевозчиками, что не позволяет считать выполненную количественную оценку выбросов полной. Учет этих сегментов технически сложен из-за недоступности полных данных об авиационной работе, выполненной российскими и зарубежными авиаперевозчиками. Тем не менее, полученные результаты позволяют установить характер, степень и тенденции воздействия на климатическую систему авиационных выбросов, а также рассмотреть возможности их снижения.

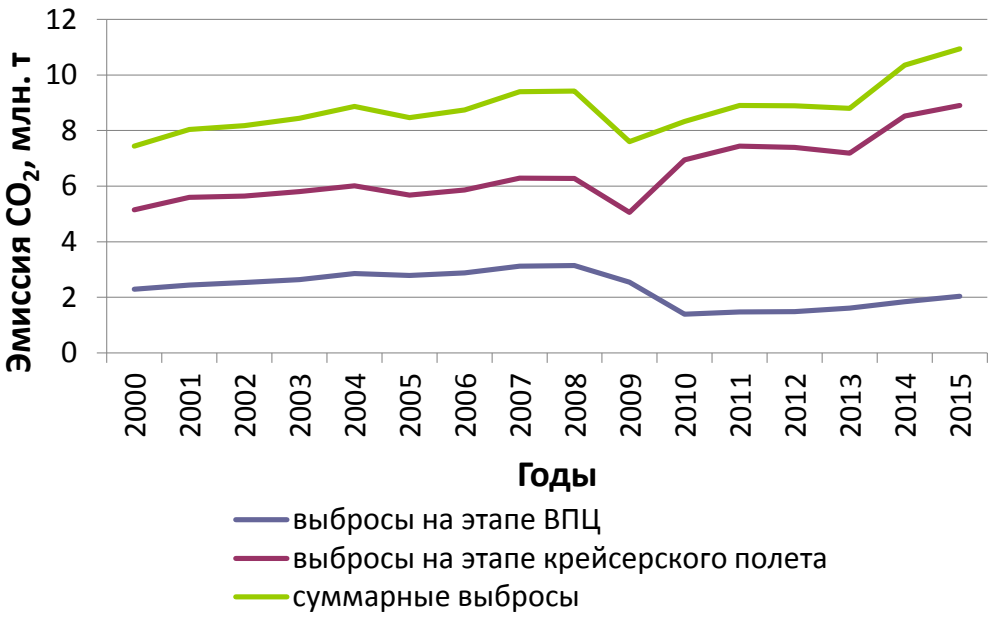

Рисунок 14 – Выбросы диоксида углерода от гражданских воздушных судов российского авиапарка во внутреннем сообщении за период 2000–2015 гг.

Авиационные выбросы зависят от интенсивности эксплуатации гражданских воздушных судов, причем абсолютные величины поступления парниковых газов в планетарный пограничный слой и в верхнюю тропосферу неравнозначны. Общим для рисунков 14 – 16 является то, что кривые выбросов в период 2008-2009 гг. продемонстрировали незначительное снижение, а с 2010 года снова стали расти. При этом во всех случаях выбросы CO_2 и N_2O были выше уровня 2000 года. Снижения, имевшие место в период с 2008 по 2009 гг., связаны с падением интенсивности авиационных перевозок, о причинах которого говорилось ранее.

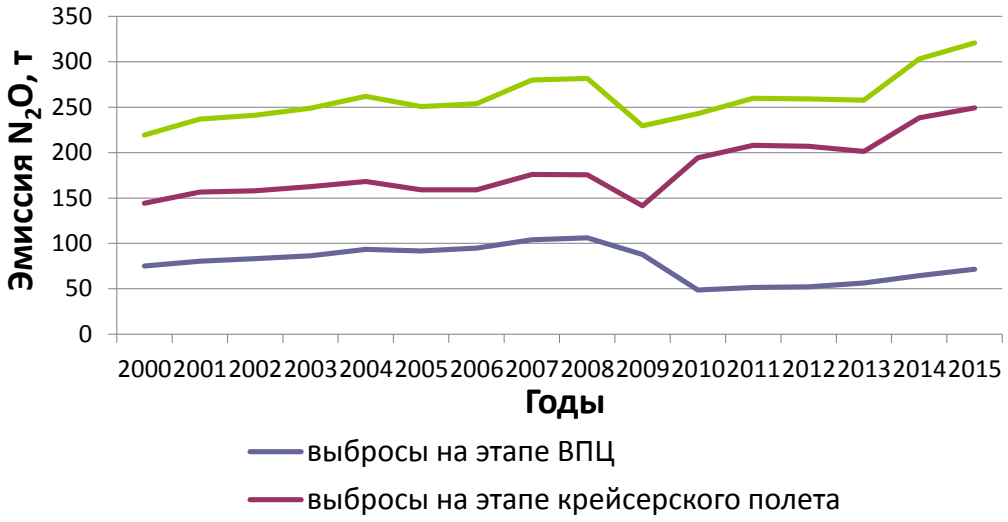

Рисунок 15 – Выбросы оксида диазота от гражданских воздушных судов российского авиапарка во внутреннем сообщении за период 2000–2015 гг.

Нельзя не отметить снижение с 2008 года выбросов CH_4 на этапе взлетно-посадочного цикла (рисунок 16). Тренд выбросов метана, хоть в целом и демонстрирует некоторый рост после снижения в 2008 году, однако по абсолютной величине он остается значительно ниже уровня 2000 года. Эмиссия в планетарный пограничный слой происходит при наземном движении, взлете и посадке воздушных судов, то есть во время взлетно-посадочных циклов. Эмиссия в верхнюю тропосферу происходит на высоте крейсерского полета. Абсолютные величины выбросов диоксида углерода и оксида диазота в планетарный

пограничный слой в 2 и более раз ниже, чем на крейсерском полете (рисунки 14 и 15). Выброс метана, наоборот, существенно выше в планетарном пограничном слое по сравнению с верхней тропосферой, даже несмотря на заметное снижение после 2008 года (рисунок 16).

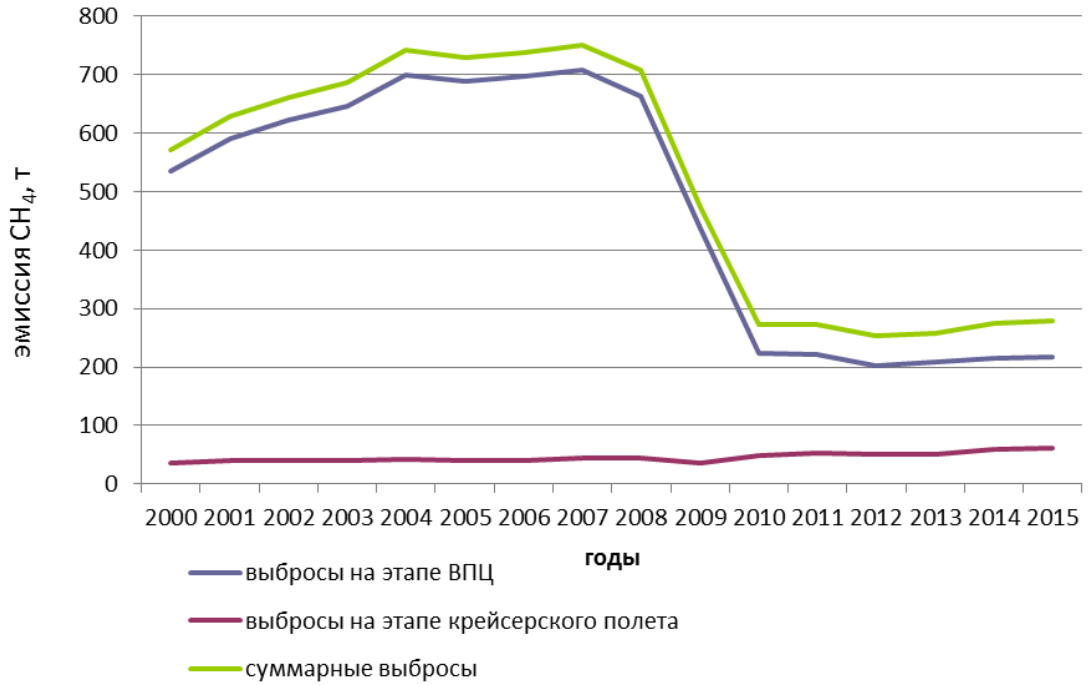

Рисунок 16 – Выбросы метана от гражданских воздушных судов российского авиапарка во внутреннем сообщении за период 2000–2015 гг.

Метан является единственным парниковым газом, выбросы которого являются наименьшими именно на этапе крейсерского полета, что объясняется наилучшей интенсивностью сгорания авиатоплива на номинальном режиме работы двигателя, в то время как изменения режима работы во время взлетно-посадочного цикла приводят к повышению коэффициента недожога и, как следствие, росту выбросов CH_4. По-видимому, наиболее значительное снижение выбросов метана, связано не только с общим сокращением числа взлетов и посадок благодаря применению дальнемагистральных самолетов (рисунок 13), но и начавшейся реструктуризацией воздушного движения гражданских самолетов в зоне российских аэропортов, которое способствовало росту эффективности сгорания авиатоплива и как следствие, снижению выбросов в атмосферу (рисунки

14 – 16). В таблице 5 представлено сравнение суммарных и детализированных по отдельным фазам полета расчетных величин выбросов диоксида углерода, оксида диазота и метана в воздушное пространство России от эксплуатации гражданских самолетов в 2000 и 2015 гг.

Таблица 5 – Выбросы парниковых газов в воздушное пространство России в 2000 и 2015 гг.

Наименование фазы полета	**Выброс в расчетном году**					
	2000 г.			**2015 г.**		
	CO_2, млн.т	**N_2O, тыс.т**	**CH_4, тыс.т**	**CO_2, млн.т**	**N_2O, тыс.т**	**CH_4, тыс.т**
ВПЦ	2,29	0,08	0,54	2,04	0,07	0,22
Крейсерский полет	5,15	0,14	0,04	8,91	0,25	0,06
Суммарные выбросы	7,44	0,22	0,57	10,94	0,32	0,28

В период с 2000 по 2015 гг. в воздушное пространство России в общей сложности поступило 140,8 млн. т диоксида углерода, 8,3 тыс. т метана и 4,1 тыс. т оксида диазота. Как следует из таблицы 5, за период с 2000 по 2015 гг. выбросы CO_2 в планетарный пограничный слой на фазе ВПЦ снизились на 11%, а на крейсерском полете выросли на 73%. Эмиссия N_2O снизилась на фазе ВПЦ на 13%, но на крейсерском полете она возросла на 79%. Выбросы CH_4 во время ВПЦ снизились на 59%, а на этапе крейсерского полета увеличились на 50%. При этом суммарные выбросы в атмосферу диоксида углерода и оксида диазота возросли соответственно на 47% и 46%, что является отражением увеличения интенсивности авиационной работы российских гражданских воздушных судов за первые шестнадцать лет 21 века. За этот же период общая эмиссия метана снизилась на 51% благодаря значительному снижению на фазе ВПЦ (таблица 5). Таким образом, результаты расчетов показывают, что деятельность отечественной

гражданской авиации способствует общему увеличению выбросов парниковых газов и, соответственно, антропогенной нагрузки на климатическую систему. Принимая во внимание прогнозируемый рост авиационной деятельности, о котором говорилось в главе 1, можно ожидать, что эта нагрузка будет и дальше расти. Если к полученным величинам добавить не учтенные выбросы от международных авиаперелетов и транзитных пролетов в воздушном пространстве России, то нагрузка на климатическую систему окажется еще больше.

Как упоминалось в главе 1, по абсолютной величине авиационные выбросы составляют менее 1% национальных выбросов (Дмитриева, Грабар, 2017; Дмитриева, 2014; Грабар и др., 2009). Однако, учитывая высокую интенсивность их роста в верхней тропосфере, а также способность распространяться на большие расстояния и недостаточную изученность воздействия на климатическую систему некоторых их компонентов, таких как, например, водяной пар, представляется целесообразной организация контроля негативных эффектов, вызываемых этими выбросами в верхней тропосфере. Такой контроль может быть реализован в форме систематического расчетного мониторинга гражданских авиационных выбросов. Мониторинг выбросов и содержания продуктов сгорания авиатоплив в верхней тропосфере над территорией России может быть реализован в рамках подготовки ежегодной национальной отчетности об антропогенных выбросах из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов.

3.3 Выбросы загрязняющих веществ в воздушное пространство России

Ужесточение контроля атмосферной эмиссии загрязняющих веществ в развитых странах – участницах Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) привело к снижению, а затем и стабилизации к концу 20 века глобальных выбросов основных загрязнителей (SO_2, CH_4, CO, NO_x), а также летучих органических соединений и аэрозолей. Однако последнее время вновь

наблюдается рост этих выбросов благодаря быстрому экономическому росту развивающихся стран, в первую очередь, Индии, Бразилии и Китая (Climate Change 2013, Isaksen et al., 2009).

В настоящее время мировая авиация потребляет 2 – 3% общего количества ископаемого топлива, из которых 80% расходуется в гражданской авиации (ГосНИИ ГА, 2002). На рубеже 1980 – 1990-х годов загрязнение атмосферного воздуха объектами гражданской авиационной отрасли России оценивалось в 660 тыс. т в год, из которых 600 тыс. т выбрасывалось с отработанными газами авиадвигателей, а остальное (60 тыс. т) - результат деятельности стационарных источников загрязнения (ICAO, 2010).

На рисунке 17, составленном автором по данным Государственного доклада о состоянии и охране окружающей среды (Государственный доклад, 2005), представлено сравнение выбросов загрязняющих веществ от гражданской авиационной отрасли и других экономических секторов в районе аэропортов в 1997 и 2000 годах. В 1997 г. объем выбросов вредных веществ от гражданской авиационной отрасли России в планетарный пограничный слой атмосферного воздуха составил 56 тыс. т (32% общего объема выбросов). Выбросы загрязняющих веществ на высотах более 900 м оценены в 118 тыс. т (68% общего объема выбросов). В 2000 г. выбросы загрязняющих веществ в районе аэропортов были оценены в 34,6 тыс. т (24%), а на высотах более 900 м - в 110 тыс. т или 76% общего объема выбросов (рисунок 17). Несмотря на доминирование объектов гражданской авиации в профиле выбросов загрязняющих веществ в зоне аэропортов (рисунок 17), общее влияние российской гражданской авиации на химический состав атмосферы невелико. Развитие авиационной техники уже привело к тому, что за последние 40 лет затраты топлива на 1 пассажиро-километр снизились на 70%. К 2015 г. можно ожидать увеличения эффективности топливозатрат на 20%, а к 2050 г. она может возрасти на 40 – 50%. Эти оценки уже включены в прогнозы роста влияния авиации на атмосферу в первой половине 21 века (IPCC, 1999).

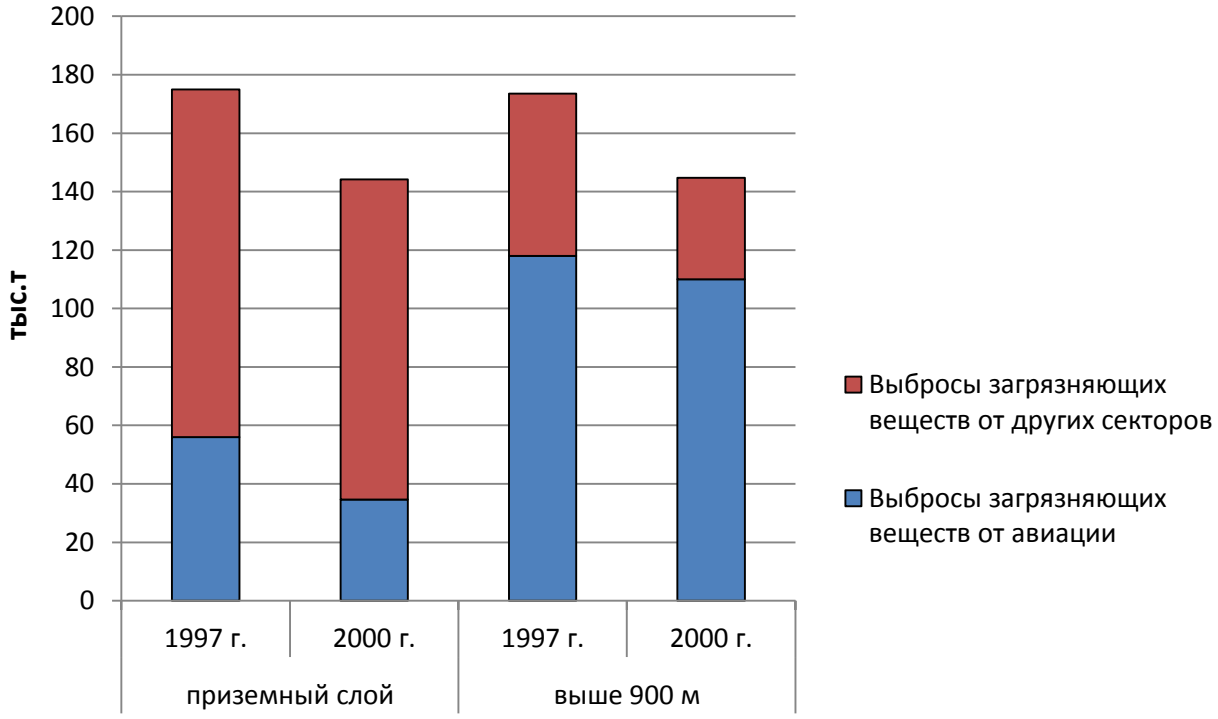

Рисунок 17 – Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу гражданской авиационной отрасли и других экономических секторов в районе аэропортов по состоянию на 1997 и 2000 гг., полученные автором по данным (Государственный доклад, 2005)

В соответствии с Приложением 16 к международной конвенции о гражданской авиации, в настоящее время введены и действуют экологические нормативы на выбросы загрязняющих атмосферу веществ, включая выбросы несгоревших углеводородов (C_nH_m), оксида углерода (CO), оксидов азота (NO_x (NO и NO_2)) и дыма (твердые частицы, или сажа). Кроме того, запрещен преднамеренный сброс топлива в атмосферу гражданской авиацией в зоне аэропортов. Действие запрета распространяется на турбореактивные и турбовентиляторные двигатели тягой больше 26,7 кН (Приложение 16 к Конвенции…, 2008; Яновский и др., 2004). На режиме малого газа выбросы C_nH_m и CO являются максимальными. Во время взлета, набора высоты и крейсерского полета масса выбросов углеводородов и оксида углерода очень незначительная. Выбросы NO_x ведут себя противоположно: их максимум образуется при наибольшей тяге двигателя.

Впервые международный стандарт для эмиссии двигателей воздушных судов был принят в 1981 году. После этого нормативы на выбросы CO и C_nH_m, оксида углерода не менялись, а норма на эмиссию NO_x была трижды пересмотрена в сторону уменьшения допустимых уровней выбросов. На 8-м совещании CAEP в 2010 г. были вновь рекомендованы стандарты на NO_x, предусматривающие сокращение их допустимых выбросов на 15% по сравнению с ныне действующими. В рамках Союза независимых государств (СНГ), эмиссия вредных веществ регулируются Авиационными правилами АП-34 «Охрана окружающей среды. Нормы эмиссии для авиационных двигателей»,[9] которые практически соответствуют международным требованиям. Наблюдающаяся тенденция к ужесточению нормативов ИКАО требует дальнейших совершенствований в области авиационной техники. В частности, необходимость снижения выбросов загрязняющих веществ от газотурбинных авиадвигателей способствует совершенствованию конструкций камер сгорания, постоянному повышению их эффективности и использованию более экологически чистых топлив. Результаты расчетов массы выбросов загрязняющих веществ, несгоревших углеводородов, оксида углерода, оксидов азота и диоксида серы, в струе выхлопа авиадвигателей воздушных судов за период с 2000 по 2015 гг. представлены на рисунках 18 – 21.

Работа авиационных двигателей во время взлетно-посадочного цикла характеризуется наибольшими по абсолютной величине удельными выбросами метана и летучих углеводородов неметанового ряда. Эти же газообразные вещества выбрасываются и на крейсерском полете, но уже в существенно меньших количествах. Между тем, выбросы несгоревших углеводородов в планетарном пограничном слое на фазе ВПЦ снизились на 48% (с 5,9 до 3,1 тыс. т), а на высоте крейсерского полета незначительно увеличились – на 5% (с 4,1 до 4,3 тыс. т). При этом сохраняется тенденция снижения выбросов в период с 2008 по 2010 гг. и затем их незначительного роста. До 2009 года несгоревших

[9] Авиационные правила АП-34 «Охрана окружающей среды. Эмиссия загрязняющих веществ авиационными двигателями. Нормы и испытания», Межгосударственный авиационный комитет, 2003.

углеводородов при взлетах и посадках выбрасывались больше, чем во время крейсерского полета. Однако после 2009 г. выбросы в планетарный пограничный слой заметно сократились, и масса выбросов на крейсерском полете стала больше при том, что выбросы на высоте крейсерского полета изменились незначительно (рисунок 18). Такое изменение тренда выбросов на фазе ВПЦ, вероятно, связано с изменением общего количества взлетов и посадок (как видно из рисунка 13).

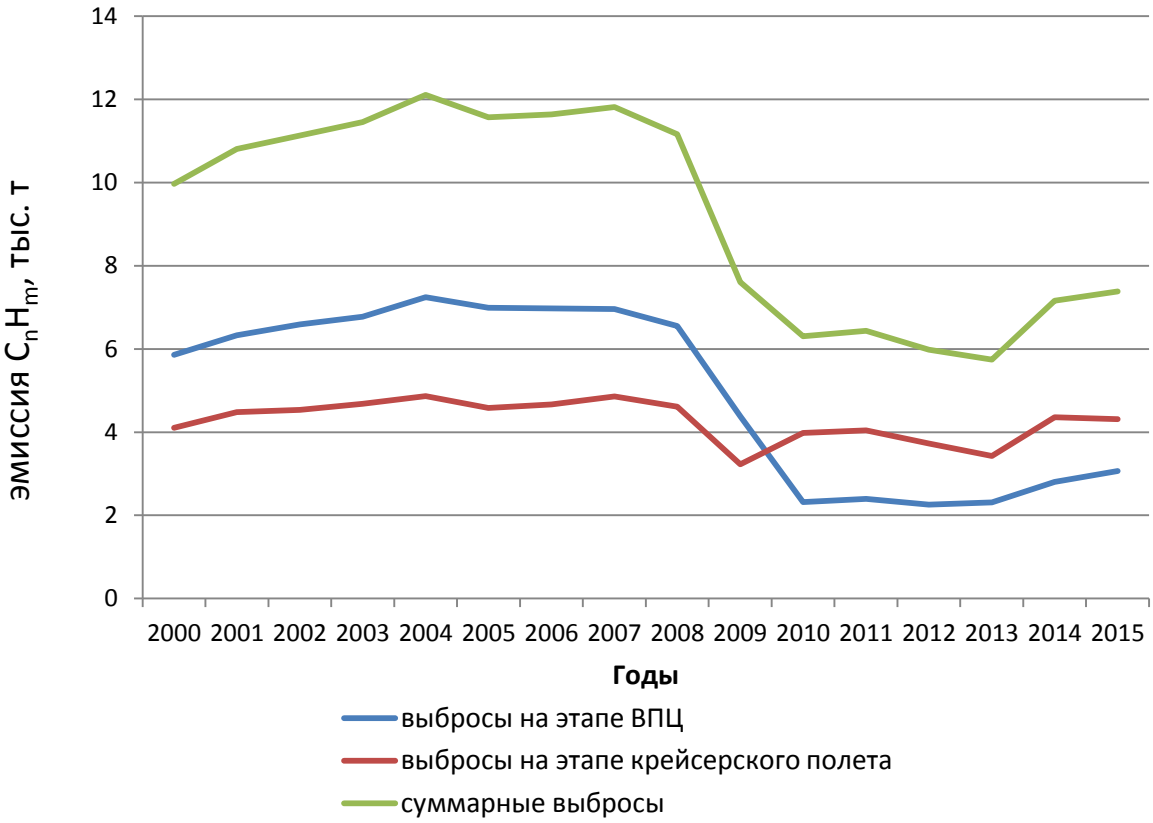

Рисунок 18 – Выбросы несгоревших углеводородов от гражданских воздушных судов во внутреннем сообщении за период 2000–2015 гг.

Результаты расчета выбросов оксида углерода за рассматриваемый период показали, что его выбросы в планетарный пограничный слой снизились на 7% (с 19,5 до 18,1 тыс. т), а в верхнюю тропосферу во время крейсерского полета выросли на 69%, с 10,8 до 18,2 тыс. т (рисунок 19). Сравнительный анализ динамики авиационных выбросов несгоревших углеводородов и оксида углерода (рисунки 18 и 19) и динамики налета и взлетно-посадочных циклов (рисунки 12 и

13) показывает, что тренды изменения количества выбросов несгоревших углеводородов и оксида углерода идентичны и согласуются с динамикой числа ВПЦ и общим увеличением часов налета воздушных судов. Также следует отметить, что выбросы углеводородов и оксида углерода весьма зависимы от изменения численности взлетно-посадочных циклов.

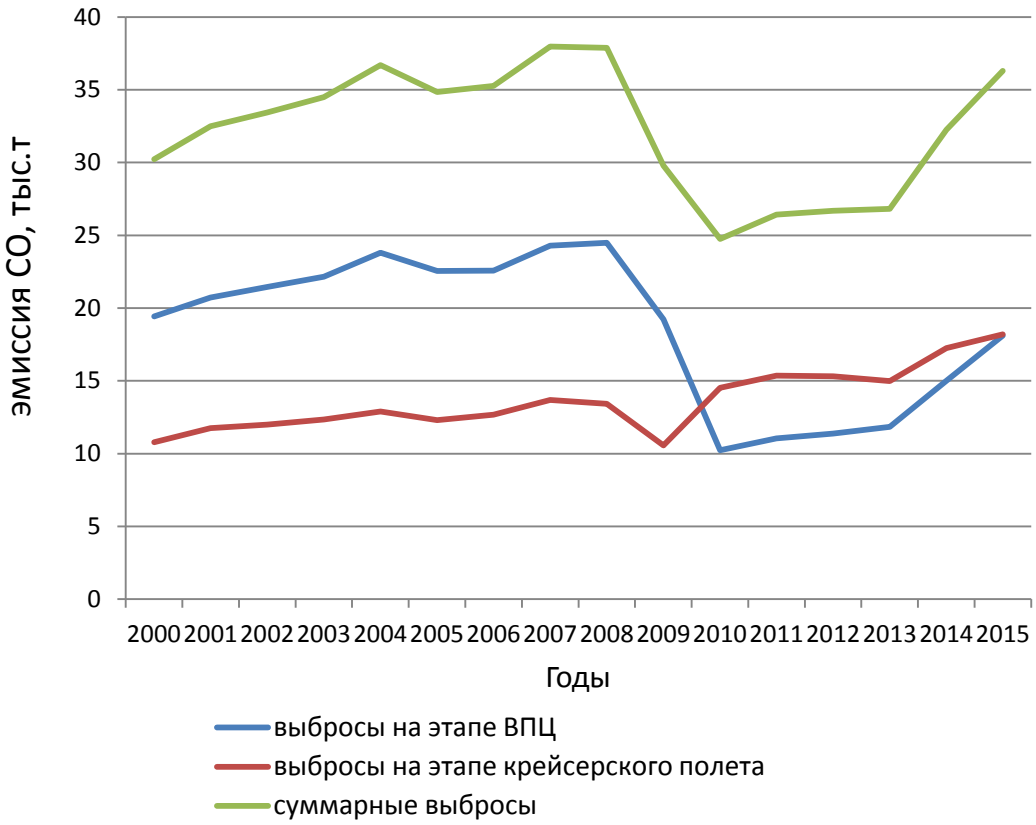

Рисунок 19 – Выбросы оксида углерода от гражданских воздушных судов российского авиапарка во внутреннем сообщении за период 2000–2015 гг.

Согласно выполненным автором расчетам, выбросы оксидов азота на фазе ВПЦ за рассматриваемый период увеличились на 24% (с 6,7 до 8,3 тыс. т), а выбросы на высоте крейсерского полета увеличились на 84% (с 21 до 38,7 тыс. т). Поскольку наибольшее увеличение массы выбросов наблюдается на высоте крейсерского полета и незначительное изменение в планетарном пограничном слое, выбросы оксидов азота в большей степени зависят от налета, то есть от интенсивности эксплуатации воздушных судов в верхней тропосфере, о чем уже говорилось выше (рисунок 20).

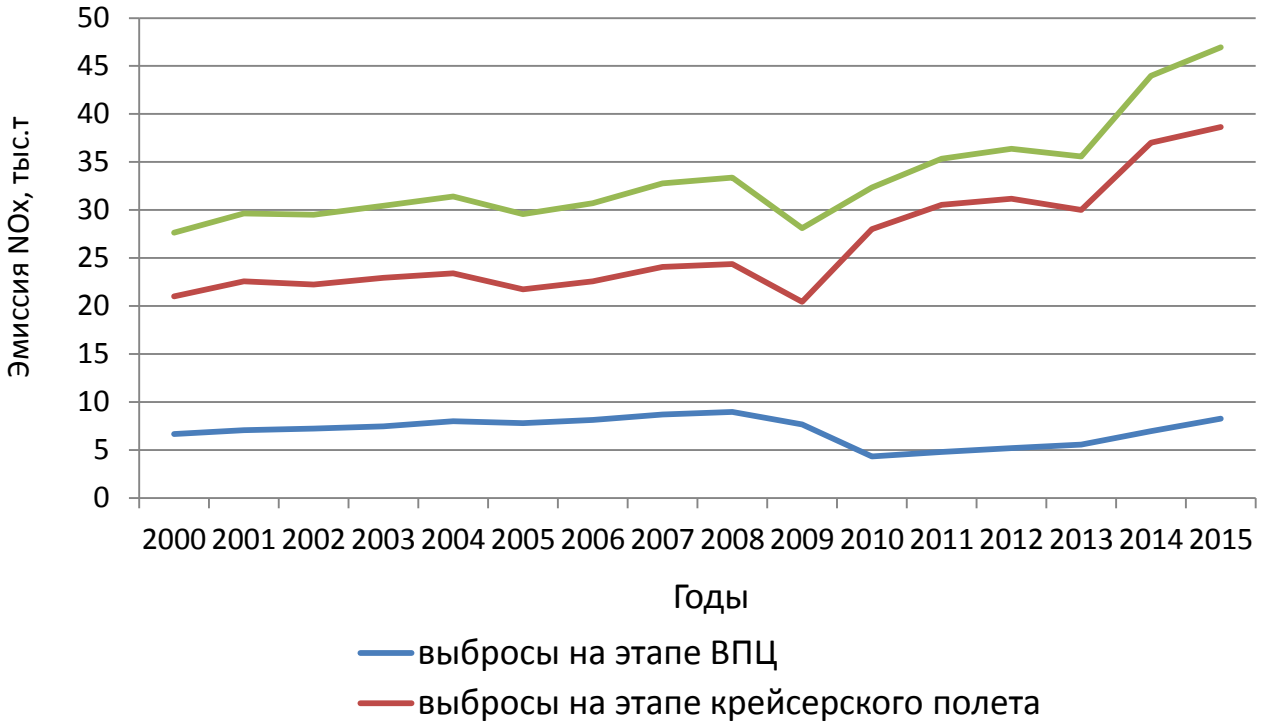

Рисунок 20 – Выбросы оксидов азота от гражданских воздушных судов российского авиапарки во внутреннем сообщении за период 2000–2015 гг.

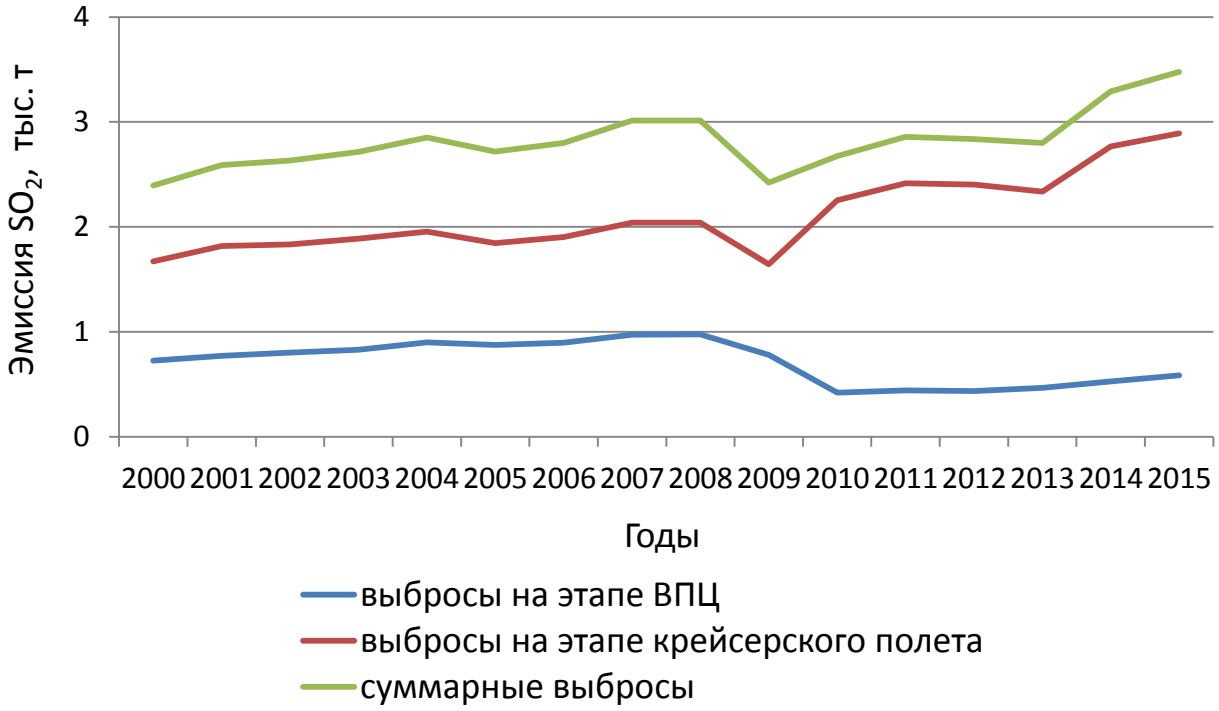

Рисунок 21 – Выбросы диоксида серы от гражданских воздушных судов российского авиапарки во внутреннем сообщении за период 2000–2015 гг.

Результаты расчетов показали, что за период 2000-2015 гг. выбросы диоксида серы на фазе ВПЦ снизились на 21% (с 734 до 585 т), на фазе крейсерского полета увеличились на 73% (с 1 672 до 2 892 т). Диоксид серы, также как и оксиды азота, в наибольшем количестве выбрасывается на высоте крейсерского полета и демонстрирует тенденцию постепенного роста в течение рассматриваемого периода аналогично тренду увеличения интенсивности эксплуатации воздушных судов (рисунки 11 и 21). При этом его выбросы в планетарный пограничный слой ведут себя противоположно, демонстрируя уменьшение. В таблице 6 представлены результаты расчетов массы выбросов углеводородов, оксида углерода, оксидов азота и диоксида серы в воздушное пространство России в 2000 и 2015 гг., а также суммарная масса выбросов загрязняющих веществ от гражданских воздушных судов российского парка на разных фазах полета.

Таблица 6 – Выбросы в атмосферу над территорией России загрязняющих веществ от гражданских самолетов российского авиапарка в 2000 и 2015 гг.

Наименование фазы полета	**Выброс в расчетном году, тыс. т**							
	2000 г.				**2015 г.**			
	C_nH_m	**CO**	**NO_x**	**SO_2**	**C_nH_m**	**CO**	**NO_x**	**SO_2**
ВПЦ	5,86	19,44	6,66	0,73	3,07	18,10	8,27	0,58
Крейсерский полет	4,11	10,79	20,99	1,67	4,31	18,19	38,66	2,89
Суммарные выбросы	9,97	30,22	27,65	2,41	7,38	36,29	46,94	3,48

Работа авиационных двигателей во время взлетно-посадочного цикла характеризуется незначительным снижением выбросов углеводородов и оксида углерода. Оксиды азота и диоксид серы в наибольшем количестве образуются на высоте крейсерского полета, и в значительно меньших количествах они выбрасываются в пограничный слой. В период с 2000 по 2015 гг. в воздушное

пространство России поступило в общей сложности 148,3 тыс. т углеводородов, 516,3 тыс. т оксида углерода, 533,8 тыс. т оксидов азота и 45,1 тыс. т. диоксида серы. Сравнение величин суммарных выбросов в атмосферу в 2000 и 2015 гг. показало, что эмиссия несгоревших углеводородов снизилась на 26%, но выбросы остальных загрязнителей возросли: оксида углерода – на 20%, оксидов азота – на 70% и диоксида серы – на 44% (таблица 5).

Как и в случае парниковых газов, интенсивность выбросов загрязняющих веществ зависит от авиационной работы, совершаемой гражданскими воздушными судами. При этом в 2015 году в планетарный пограничный слой углеводородов и наиболее серьезных загрязнителей – диоксида серы и оксида углерода поступило меньше, чем в 2000 г., тогда как выбросы окислов азота возросли (рисунки 18 – 21). Основными причинами наблюдаемых тенденций, скорее всего, являются сокращение числа взлетно-посадочных циклов (рисунок 13) и реструктуризация системы регулирования гражданского воздушного сообщения. Отмеченные снижения произошли на фоне общего роста налета гражданских воздушных судов – свидетельства интенсивной авиационной работы (рисунок 11), что позволяет сделать вывод об улучшении экологических показателей гражданской авиации России. В то же время нельзя не отметить, что, за исключением мало изменившегося выброса углеводородов, поступление всех других загрязнителей в верхнюю тропосферу демонстрирует устойчивый рост. Поскольку приведенные результаты не включают выбросы от международных авиаперелетов и транзитные пролеты в воздушном пространстве России, фактическое загрязнение верхних слоев тропосферы будет еще более значительным. И это при том, что именно в этой зоне наблюдается значительный ветровой перенос на большие расстояния и, кроме того, происходит формирование локального климата.

Таким образом, сокращение числа взлетно-посадочных циклов и усовершенствование системы воздушного движения в начале нашего века способствовали снижению выбросов загрязняющих веществ и улучшению качества воздуха в пограничном слое, а также в целом улучшению состояния

окружающей среды в зонах географической локализации аэропортов. Надо однако признать, что полученные результаты не позволяют сделать однозначный вывод об улучшении экологической обстановки в районе отдельных аэропортов, особенно крупных транспортно-пересадочных узлов, где имеет место не только интенсивное движение воздушных судов, но и очень высока активность наземных служб и аэропортовой инфраструктуры. Следует заместить, что оценка выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов в районе крупных аэропортов является отдельной задачей, которая не входила в цели настоящего исследования.

В это же время в верхних слоях тропосферы, куда газообразные продукты выбросов попадают во время крейсерского полета, за этот же период загрязнение атмосферного воздуха увеличилось. Поскольку авиация является приоритетным источником загрязнения воздуха на высоте 9 – 13 км, состояние верхней тропосферы требует систематического контроля, несмотря на то, что по абсолютной величине масса авиационных выбросов пока остается незначительной.

Важной частью расчетных работ является оценка их погрешности. Точность расчетов определяется точностью исходных данных, коэффициентов эмиссии и других параметров, использованных в расчетах. Показатели интенсивности воздушного движения собираются ежедневно. Согласно экспертным оценкам, предпринятым при подготовке национальных кадастров парниковых газов, точность таких данных высокая: ошибки при их обобщении могут составлять не более ±7%. Еще более точны данные об использовании авиационного топлива – здесь ошибки не превышают ±5% (Российская Федерация, 2017; МГЭИК, 2000; МГЭИК, 2006). Однако применение формул (1) – (7) предполагает многочисленные пересчеты полученных значений в массовые величины выбросов, а затем – в эквивалент CO_2. Для этого были использованы различные коэффициенты, в том числе рекомендованные МГЭИК. Как указывается в методических руководствах МГЭИК, неопределенность коэффициентов выбросов диоксида углерода для разных видов топлив находится в пределах ±5%. Неопределенность коэффициента выбросов CH_4 может быть от –57% до +100%.

Неопределенность коэффициента выбросов N_2O может составлять от –76% до +150% (IPCC, 1997; МГЭИК, 2000; МГЭИК, 2006). Ошибки определения потенциалов глобального потепления различных парниковых газов и газообразных загрязняющих веществ могут быть еще больше (МГЭИК, 2007; Climate Change 1995; Myhre et al., 2013 и др.). При использовании коэффициентов с таким большим разбросом неопределенности погрешности расчетов будут, безусловно, большими. Но следует отметить, что достижение высокой точности расчетов не входило в задачи автора. Напротив, в заявленных цели и задачах речь идет о разработке методических подходов, а также алгоритма расчетной оценки выбросов. Повышение точности получаемых оценок следует рассматривать в качестве одной из приоритетных задач дальнейших исследований автора.

Таким образом, в пределах территории Российской Федерации выбросы парниковых газов и загрязняющих веществ от гражданских воздушных судов оказывают неравнозначное воздействие на верхнюю тропосферу и планетарный пограничный слой. За первые 16 лет 21 в. негативная нагрузка на планетарный пограничный слой, где расположены основные природные системы и населенные пункты, в части выбросов парниковых газов уменьшилась на 11%(CO_2) – 59% (CH_4), а по выбросам приоритетных загрязняющих веществ (кроме NO_x) – снизилась на 7% (CO) – 48% (C_nH_m,). Воздействие на верхнюю тропосферу парниковых газов увеличилось на 50% (CH_4) – 79% (N_2O), а приоритетных загрязняющих веществ – на 5% (C_nH_m,) – 84% (NO_x).

Сокращение числа взлетно-посадочных циклов и усовершенствование системы воздушного движения в начале нашего века способствовали снижению выбросов загрязняющих веществ и улучшению качества воздуха в пограничном слое, а также в целом улучшению состояния окружающей среды в зонах географической локализации аэропортов. Однако, полученные результаты не позволяют сделать однозначный вывод об улучшении экологической обстановки в районе конкретных аэропортов, особенно крупных транспортно-пересадочных узлов, где сосредоточено не только интенсивное движение воздушных судов, но и высока активность наземных служб и аэропортовой инфраструктуры.

Выводы по главе 3

По итогам 3 главы можно сделать следующие выводы:

- Анализ авиационной работы гражданских воздушных судов показывает, что в первые шестнадцать лет 21 в. общий налет во внутреннем сообщении увеличился на 57%, а количество взлетно-посадочных циклов – на 9%. Наблюдаемый рост обусловлен увеличением интенсивности воздушного сообщения в России. Сравнительно незначительное увеличение числа взлетно-посадочных циклов обусловлено обновлением авиационного парка дальнемагистральными самолетами и усовершенствованием воздушно-транспортного движения.

- С 2000 по 2015 г. в воздушное пространство России поступило 140,8 млн. т CO_2, 8,3 тыс. т CH_4 и 4,1 тыс. т N_2O. Выброс диоксида углерода в планетарный пограничный слой снизился на 11%, а в верхнюю тропосферу увеличился на 73%. Выброс оксида диазота в планетарный пограничный слой снизился на 13%, а в верхнюю тропосферу вырос на 79%. Выбросы метана в нижнюю тропосферу снизились на 59%, а в верхнюю тропосферу увеличились незначительно – на 50%. Таким образом, нагрузка на климатическую систему отечественной гражданской авиации снижается в планетарном пограничном слое, но растет в верхней тропосфере.

- В период с 2000 по 2015 г. российские гражданские воздушные суда выбросили в воздушное пространство 148,3 тыс. т C_nH_m, 516,3 тыс. т CO, 533,8 тыс. т NO_x и 45,1 тыс. т. SO_2. Суммарные выбросы в атмосферу углеводородов снизились на 26%, а оксида углерода, оксидов азота и диоксида серы выросли на 20%, 70% и 44% соответственно. Величины выбросов в планетарный пограничный слой C_nH_m снизились на 48%, SO_2 – на 21% и CO – на 7%. Выбросы NO_x увеличились на 24%. Сокращение выбросов основных загрязняющих веществ улучшает качество планетарного пограничного слоя воздуха, но в верхней тропосфере выбросы загрязняющих веществ возросли.

• В пределах территории Российской Федерации выбросы парниковых газов и загрязняющих веществ от гражданских воздушных судов оказывают неравнозначное воздействие на верхнюю тропосферу и планетарный пограничный слой. За первые 16 лет 21 в. негативная нагрузка на планетарный пограничный слой, где расположены основные природные системы и населенные пункты, в части выбросов парниковых газов уменьшилась на 11%(CO_2) – 59% (CH_4), а по выбросам приоритетных загрязняющих веществ (кроме NO_x) – снизилась на 7% (CO) – 48% (C_nH_m,). Воздействие на верхнюю тропосферу парниковых газов увеличилось на 50% (CH_4) – 79% (N_2O), а приоритетных загрязняющих веществ – на 5% (C_nH_m,) – 84% (NO_x).

• Таким образом, в начале 21 в. на всей территории Российской Федерации снизилась негативная нагрузка выбросов российского авиапарка на планетарный пограничный слой, где расположены основные природные системы и населенные пункты. Этому способствовали обновление парка воздушных судов, оптимизация воздушно-транспортного движения и незначительный рост числа взлетов и посадок на фоне общего увеличения интенсивности авиаперевозок. В то же время возросшая интенсивность авиасообщения привела к увеличению воздействия на верхнюю тропосферу.

ГЛАВА 4 АНАЛИЗ СОВОКУПНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ГРАЖДАНСКИХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ И КЛИМАТ

Как указано в главе 1, различные загрязняющие вещества и парниковые газы, попадающие в атмосферу из двигателей гражданских воздушных судов, оказывают неравнозначное воздействие на окружающую среду. При одновременном поступлении в атмосферный воздух разных по характеру действия газообразных соединений совокупный негативный эффект может усиливаться либо ослабляться, а также различаться по высоте (планетарный пограничный слой – верхняя тропосфера). Поскольку в реальных условиях в атмосферу одновременно поступают и загрязняющие вещества, и парниковые газы, исследование их комбинированного воздействия представляется актуальной задачей (Climate Change 2013; Isaksen et al., 2009; Swart et al., 2004; и др.). Надо признать, что в современной научной литературе количественные оценки совместного воздействия загрязняющих веществ и парниковых газов немногочисленны. Поэтому предложенный автором в главе 2 метод оценки совокупного влияния парниковых газов и газообразных загрязняющих веществ, оказывающих косвенное воздействие на климатическую систему, через совместный анализ их выбросов можно рассматривать как оригинальный инновационный подход, полностью отвечающий критериям новизны и практической значимости, предъявляемым к диссертационным исследованиям.

На рисунке 22 приведена расчетная оценка совокупной эмиссии приоритетных парниковых газов и газообразных загрязняющих веществ с косвенным воздействием на климат (CO_2, CH_4, N_2O, SO_2, NO_x и CO), выраженная в эквиваленте CO_2 и детализированная по отдельным фазам авиационной работы гражданских воздушных судов российского авиапарка. По существу, представленные на рисунке 22 оценки измеряют совместное климатическое воздействие рассматриваемых газообразных веществ.

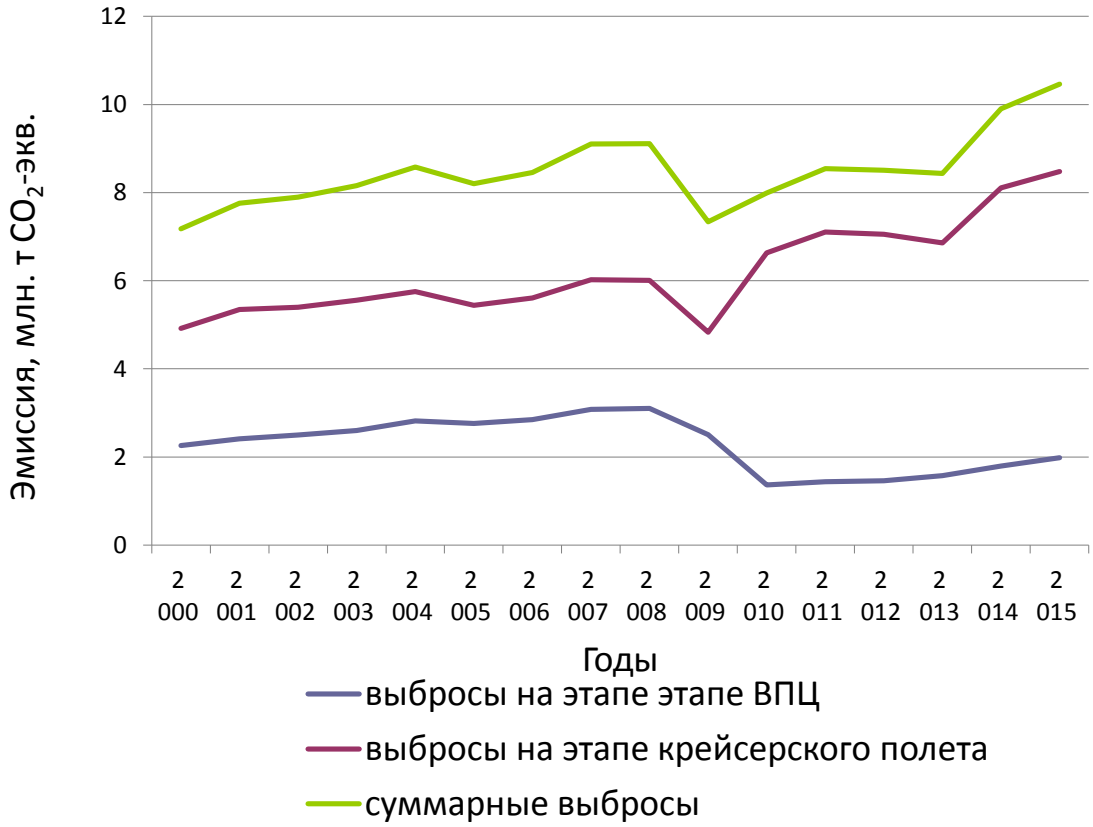

Рисунок 22 – Совокупная эмиссия парниковых газов и загрязняющих веществ, оказывающих косвенное воздействие на климат, детализированная по этапам авиационной работы гражданских воздушных судов, тыс. т CO_2-экв.

Как видно из рисунка 22, в верхнюю тропосферу во время крейсерского полета поступает в несколько раз больше выбросов, чем в планетарный пограничный слой при взлетах и посадках самолетов. Помимо прочего, уменьшение выбросов на фазе взлета – посадки обусловлено использованием с 2009 г. на внутренних авиалиниях воздушных судов с большей дальностью полета, что привело к сокращению числа взлетов и посадок для дозаправки, о чем уже упоминалось в предыдущей главе. В 2015 г. выбросы загрязняющих веществ, оказывающих косвенное воздействие на климат, и парниковых газов в пограничный слой на фазе ВПЦ составили около 2,0 млн. т CO_2-экв., что на 12% ниже уровня 2000 г. (2,3 млн. т CO_2-экв.). В то же время в 2015 году общее время налета воздушными судами выросло на 57% по сравнению с 2000 г. (рисунок 11). Этот рост привел к увеличению атмосферных выбросов парниковых газов и

загрязняющих веществ с косвенным воздействием на климат в верхние слои тропосферы во время крейсерского полета на 72% (с 4,9 до 8,5 млн. т CO_2-экв.), при этом доля использования воздушных судов зарубежного производства после 2009 г. увеличилась (рисунки 11 и 12). В 2015 г. общие эквивалентные выбросы (т.е. выбросы в CO_2-экв.) выросли по сравнению с 2000 г. на 46% (с 7,2 до 10,5 млн. т). В их компонентном составе преобладал CO_2, на долю которого пришлось 94%. Вклад других газов составил CH_4 – 0,2%, N_2O – 0,7%, CO – 0,7%, NO_x – 3,8% и SO_2 – 1,2% соответственно.

Оценки совокупного воздействия, представленные на рисунке 22, характеризуют воздействие гражданских воздушных судов на климатическую систему. Характер изменения во времени выбросов продуктов сгорания авиатоплива отражает общую тенденцию роста интенсивности гражданских воздушных перевозок в первые шестнадцать лет 21 века. Причем межгодовая изменчивость совокупных выбросов достаточно чутко реагирует на общеэкономическую ситуацию в стране. Так, увеличение выбросов с 2000 по 2008 гг. обусловлено общим экономическим ростом, следствием которого являлось активное развитие межрегиональных связей и, соответственно, воздушного сообщения. Экономический кризис 2008 года привел к спаду внутреннего воздушного сообщения, после чего в период 2009 – 2015 гг. снова наметился его рост. На рисунке 23 представлено примерное распределение выбросов от авиации в планетарном пограничном слое и в верхней тропосфере над территорией Российской Федерации в соответствии с расположением аэропортов и маршрутных трасс полетов воздушных судов, разработанное автором по данным http://nasamoletah.ru/poznavatelno/karta-aeroportov-rossii.html.

Наибольшая концентрация выбросов планетарном пограничном слое соответствует плотности гражданских аэропортов на ЕЧР (рисунок 23 (А)), о чем уже говорилось в предыдущих главах. В свою очередь, накопление продуктов авиационных выбросов в верхней тропосфере наблюдается практически над всей территорией России (рисунок 23 (Б)). Это наблюдение согласуется со сделанным

ранее выводом о широкомасштабном, и даже трансграничном, распространении авиационных выбросов в верхней тропосфере.

А) Б)

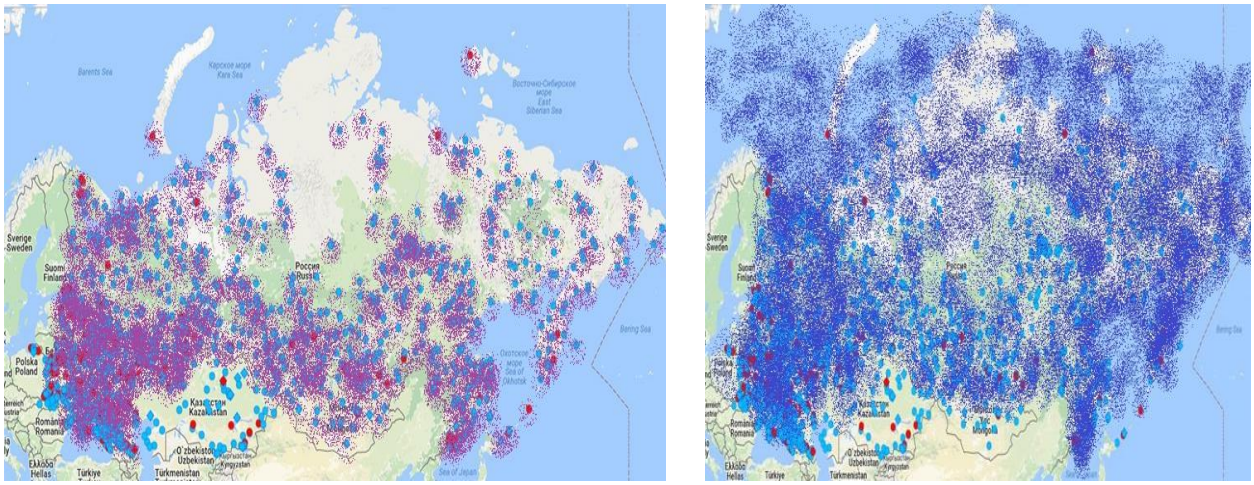

Рисунок 23 – Распределение выбросов от авиации в планетарном пограничном слое (А) и в верхней тропосфере (Б) над территорией Российской Федерации (разработано автором по данным http://nasamoletah.ru/poznavatelno/karta-aeroportov-rossii.html)

Как уже упоминалось выше, продукты сгорания авиационного топлива в планетарном пограничном слое атмосферного воздуха и в верхней тропосфере оказывают разнонаправленное действие на климатическую систему. Все парниковые газы, естественно, способствуют потеплению климата. Загрязняющие вещества с косвенным воздействием на климат в ряде случаев оказывают не только прямое положительное влияние на температуру в приповерхностном слое, но и косвенное, которое оценить значительно сложнее. Это относится, например, к оксидам азота, разнонаправленные воздействия которых подробно рассмотрены в первой главе. Действие оксидов азота на климатическую систему требует специальных исследований, которые не являлись целью настоящей работы.

Особый интерес с точки зрения замедления и, даже, компенсации современного глобального потепления представляет диоксид серы. С течением

времени в атмосфере происходит его окисление до сульфатного аэрозоля (Lee et al., 2009; Гинзбург и др., 2008; МГЭИК, 2007; и др.). Дополнительное привнесение сульфатного аэрозоля, в особенности, в верхнюю тропосферу и стратосферу, откуда он достаточно долго выводится, способствует увеличению альбедо атмосферы, уменьшению потока солнечного излучения, достигающего земной поверхности, и, следовательно, охлаждению приповерхностного слоя воздуха. Идея о возможности целенаправленного воздействия сульфатным аэрозолем на климатическую систему и, тем самым, замедления глобального потепления, была высказана еще в 70-е годы 20 века известным климатологом М.И. Будыко (Будыко, 1974). В последние годы интерес к контролируемому компенсирующему воздействию аэрозолей возрос, получив название «инженерия климата». Это направление широко развивалось в работах академика Ю.А. Израэля, П. Крутцена, А.Г. Рябошапко и других известных ученых (Израэль и др., 2007; Ревокатова, Рябошапко, 2015; Crutzen, 2006; и др.). Подобные разнонаправленные эффекты воздействия на климатическую систему также заслуживают отдельных специальных исследований, которые находятся за рамками данной работы.

Автором произведена оценка выбросов выраженных в эквиваленте CO_2 приоритетных парниковых газов и загрязняющих веществ. Результаты выполненных расчетов с разделением на вклады парниковых газов и загрязняющих веществ, оказывающих косвенное воздействие на климат, представлены на рисунке 24. На этом же рисунке показано количественное сопоставление разнонаправленных эффектов воздействия на тропосферу газообразных веществ из состава авиационных выбросов. Значения, находящиеся в положительной области, характеризуют нагрев атмосферы, а значения в отрицательной области – ее охлаждение. Использование положительных и отрицательных величин на рисунке носит иллюстративный характер и преследует цель продемонстрировать разнонаправленность и, в то же время, несопоставимость эффектов, одновременно вызываемых рассматриваемыми

парниковыми газами и загрязняющими веществами. Как следует из рисунка 24, газообразные загрязняющие вещества с косвенным воздействием на климат оказывают незначительное охлаждающее воздействие на атмосферу.

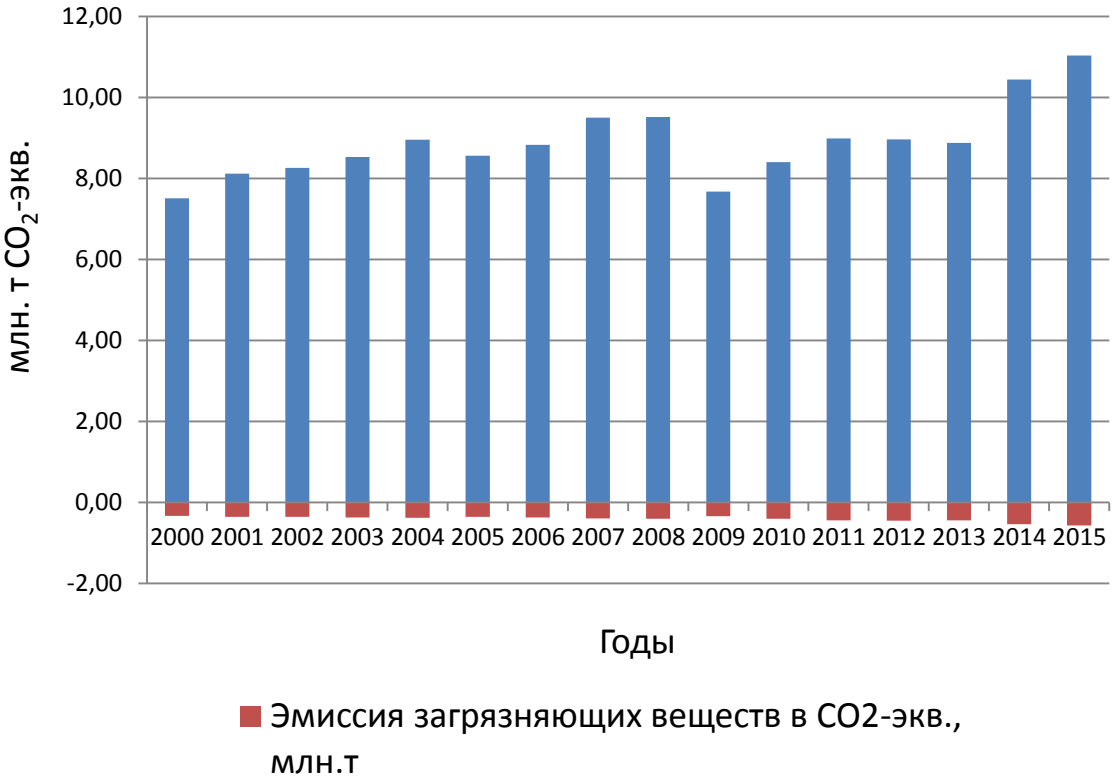

Рисунок 24 – Сопоставление эффектов воздействия на тропосферу газообразных веществ, содержащихся в выбросах гражданских воздушных судов

Согласно расчетам, абсолютные величины загрязняющих веществ оксида углерода, оксидов азота и диоксида серы, выраженные в эквиваленте CO_2, составляют около 5% от общего объема совокупных авиационных выбросов парниковых газов и загрязняющих веществ с косвенным воздействием на климат (с 2000 по 2015 гг. в воздушное пространство поступило 142,2 млн. т CO_2-экв. парниковых газов содействующих нагреву атмосферы, и 6,5 млн. т CO_2-экв. загрязняющих веществ, содействующих охлаждению атмосферы). Такие величины выбросов химических веществ, способствующих охлаждению тропосферы, не способны существенно замедлить тепличный эффект, наведенный

парниковыми газами, отходящими от авиадвигателей. Наведенный выбросами гражданских воздушных судов тепличный эффект оказался в 20 раз сильнее охлаждающего действия, создаваемого этими же выбросами.

Следовательно, охлаждение атмосферы от авиационных выбросов благодаря загрязняющим веществам, оказывающим косвенное воздействие на климат, действительно есть, но оно значительно слабее усиления парникового эффекта от высокого содержания в авиационных выбросах парниковых газов – CO_2, CH_4 и N_2O. В то же время, увеличение интенсивности полетов дозвуковых пассажирских самолетов и возможное развитие второго поколения сверхзвуковой авиации для коммерческих перевозок может оказать более существенное охлаждающее воздействие на глобальный климат за счет воздействия на стратосферный аэрозольный слой (Асатуров, 2010).

Следует заметить, что результирующее воздействие авиационной эмиссии на климатическую систему пока до конца не изучено. Существуют процессы, которые не позволяют сделать однозначное окончательное суждение о влиянии авиации на климатическую систему. К ним, например, относится охлаждающий эффект инверсионных следов и аэрозольных выбросов авиадвигателей, влияние оксидов азота на изменение концентрации озона и метана и некоторые другие, о которых говорилось в первой главе. Следует также еще раз отметить, что вклад гражданской авиации в эволюцию глобального радиационного баланса системы «Земля – атмосфера» сейчас не превышает нескольких процентов (IPCC, 1999; Дмитриева, 2014; Дмитриева, Грабар, 2017; и др.). В связи этим принятие каких-либо однозначных выводов о негативном воздействии гражданских воздушных судов на климатическую систему преждевременно.

Учитывая намерения включить гражданскую авиацию в перечень нормативно-правовых инструментов смягчения антропогенного воздействия на климат, актуально не только получение уточненных количественных оценок атмосферных выбросов от российских гражданских самолетов, но и их мониторинг в пределах территории России, о чем уже говорилось ранее. Помимо этого, другой актуальной задачей представляется определение гражданских

воздушных судов, которые оказывают наибольшее и наименьшее воздействие на климатическую систему и химический состав атмосферы, исходя из режимов их эксплуатации и технических характеристик. Для этого автором были рассчитаны удельные величины выбросов парниковых газов и газообразных загрязняющих веществ отдельных самолетов, которые эксплуатировались в воздушном пространстве Российской Федерации в течение рассматриваемого периода. Удельные выбросы определялись в пересчете в эквивалент CO_2 на тонну израсходованного топлива и на тонну максимального взлетного веса воздушного судна. В таблицах 5 и 6 Приложения представлены результаты выполненных расчетов по отельным типам гражданских самолетов российского авиапарка.

За рассматриваемый период, ведущими на рынке гражданских авиаперевозок в России стали самолеты А–319, А–320 и семейство В–737, продолжительность авиатранспортной работы которых в 2015 г. составила 180, 223 и 355 тыс. самолето-часов соответственно, или 50,3% суммарного налета российских авиакомпаний на внутренних линиях. Наблюдаемые тенденции являются следствием обновления авиационного парка, предпринятого российскими авиакомпаниями в первом десятилетии 21 в. Согласно расчетам, наименьшие удельные эквивалентные выбросы в пересчете на тонну израсходованного топлива имели А–310, А–319, А–320, А–321, В–737, В–742, В–752, В–762, В–763, В–772, Ил–62, Ил–76 и Ил–96. Если рассматривать удельные выбросы воздушных судов в пересчете на тонну максимального взлетного веса, то наименьшие показатели были следующих самолетов: В–732, В–742, В–743, В–753, В–762, В–772 и Ил–18.

Рост гражданских авиаперевозок над территорией Российской Федерации способствует усилению нагрузки на тропосферу. Представленные в настоящем диссертационном исследовании результаты являются актуальными и представляют практическую значимость в части разработки мер по контролю и ограничению антропогенного воздействия на окружающую среду и климат.

Таким образом, рост гражданских авиаперевозок над территорией Российской Федерации способствует усилению нагрузки на тропосферу. Поэтому

представленные в настоящем диссертационном исследовании результаты являются актуальными и представляют практическую значимость в части разработки мер по контролю и ограничению антропогенного воздействия на окружающую среду и климат.

Выводы по главе 4

По итогам 4 главы можно сделать следующие выводы:

- За период с 2000 по 2015 гг. включительно в атмосферу с авиационными выбросами поступило 142,2 млн. т CO_2-экв. парниковых газов и 6,5 млн. т CO_2-экв. газообразных загрязняющих веществ, продукты химического превращения которых содействуют охлаждению атмосферы. Представленный в CO_2-эквиваленте суммарный годовой выброс парниковых газов и газообразных загрязняющих веществ, оказывающих косвенное воздействие на климат, в 2015 г. вырос по сравнению с 2000 г. на 46%. При этом выбросы в верхнюю тропосферу увеличились на 72%, а выбросы в планетарный пограничный слой снизились на 12%.

- Загрязняющие вещества составляют около 5% суммарной эквивалентной массы газообразных авиационных выбросов. Их воздействие приводит к незначительному охлаждению атмосферы по сравнению с потеплением, вызываемым парниковыми газами диоксидом углерода, метаном и оксидом диазота. В целом же наведенный выбросами гражданских воздушных судов тепличный эффект оказался в 20 раз сильнее охлаждающего действия, создаваемого этими же выбросами. Таким образом, авиационные выбросы газообразных загрязняющих веществ в целом способствуют усилению парникового эффекта как в планетарном пограничном слое, так и в верхней тропосфере.

- Ведущее положение в гражданских авиаперевозках занимают самолеты А–319, А–320 и семейство В–737 и их модификации, продолжительность

авиатранспортной работы которых в последние годы достигает 50% общего налета российских авиакомпаний на внутренних линиях. Наименьшие удельные выбросы в пересчете на тонну израсходованного топлива имели А–310, А–319, А–320, А–321, В–737, В–742, В–752, В–762, В–763, В–772, Ил–62, Ил–76 и Ил–96. Наименьшие удельные выбросы в пересчете на тонну максимального взлетного веса установлены самолетов В–732, В–742, В–743, В–753, В–762, В–772 и Ил–18.

- Выбрасываемые гражданским воздушным транспортом России парниковые газы и газообразные загрязняющие вещества, оказывающие косвенное воздействие на климат, пока еще не способны существенно повлиять на состояние климатической системы. Но отмечаемый рост интенсивности работы российских гражданских воздушных судов потенциально может привести к негативным последствиям для состояния окружающей среды и климата. Поэтому целесообразно осуществление мониторинга выбросов и содержания продуктов сгорания авиатоплив в верхней тропосфере над территорией России, который может быть реализован в рамках подготовки ежегодной национальной отчетности об антропогенных выбросах из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях значительной протяженности Российской Федерации - около 10 тыс. км в широтном направлении и более 4 тыс. км в меридиональном - значимость воздушного сообщения особенно велика. Воздушный транспорт является практически единственным средством круглогодичного сообщения в труднодоступных и отдаленных районах, по некоторым оценкам составляющих до двух третей территории России. Гражданские воздушные суда эксплуатируются в верхней тропосфере и в зоне тропопаузы, где продукты сгорания авиатоплива и производные их химических трансформаций распространяются на большие расстояния в воздушных транспортных коридорах, а также за их пределами благодаря интенсивному переносу.

В авиационных выбросах гражданских самолетов содержатся водяной пар, парниковые газы, диоксид углерода, метан и оксид диазота, загрязняющие вещества и аэрозоли. Среди атмосферных загрязнителей присутствуют газообразные вещества, оказывающие косвенное воздействие на климат, включая несгоревшие углеводороды, оксид углерода, оксиды азота и диоксид серы. Рост концентраций парниковых газов меняет оптическую плотность атмосферы, приводит к изменению ее радиационно-теплового баланса и росту температуры. Рост концентраций загрязняющих веществ может усиливать воздействие парниковых газов, так как газообразные химические загрязнители зачастую являются предшественниками парниковых газов, или ослаблять наведенный парниковый эффект, вследствие химического превращения некоторых из них в вещества, отражающие коротковолновое солнечное излучение. Так, продукты химического и фотохимического превращения диоксида серы – сульфатные аэрозоли – способствуют охлаждению атмосферы благодаря увеличению ее альбедо.

С ростом интенсивности авиаперевозок возрастает потребление авиационного топлива, и, следовательно, нагрузка на окружающую среду и климат. Размеры авиационных выбросов зависят от интенсивности эксплуатации

гражданских воздушных судов. Эмиссия в планетарный пограничный слой происходит при их наземном движении, взлете и посадке, то есть во время взлетно-посадочных циклов. Эмиссия в верхнюю тропосферу происходит на высоте крейсерского полета. В период с 2000 по 2015 г. в воздушное пространство России поступило 140,8 млн. т CO_2, 8,3 тыс. т CH_4 и 4,1 тыс. т N_2O. За этот же период выбросы газообразных загрязняющих веществ составили 148,3 тыс. т C_nH_m, 516,3 тыс. т CO, 533,8 тыс. т NO_x и 45,1 тыс. т. SO_2. Несмотря на увеличение общего объема авиаперевозок, обновление парка воздушных судов и оптимизация воздушно-транспортного движения в первом десятилетии 21 в. способствовали сдерживанию роста выбросов в атмосферу, в особенности в планетарный пограничный слой, в котором осуществляются взлеты и посадки гражданских самолетов.

С 2000 по 2015 годы в воздушное пространство Российской Федерации поступило 142,2 млн. т CO_2-экв. парниковых газов, содействующих нагреву атмосферы, и 6,5 млн. т CO_2-экв. загрязняющих веществ, содействующих ее охлаждению. Таким образом, величины выбросов загрязняющих веществ, оказывающих косвенное воздействие на климат (оксид углерода, оксиды азота и диоксид серы), составили около 5% массы совокупных эквивалентных авиационных выбросов. Наведенный тепличный эффект от выбросов гражданских воздушных судов оказался в 20 раз сильнее создаваемого ими охлаждающего действия.

Ведущее положение в гражданских авиаперевозках в России занимают самолеты А–319, А–320 и В–737 и их модификации, продолжительность авиатранспортной работы которых в последние годы достигает 45% общего налета на внутренних линиях. Сопоставление динамики роста показателей авиационной работы российских гражданских самолетов с 2001 по 2015 гг. позволяет заключить, что при осуществлении внутрироссийских авиаперевозок все большее предпочтение отдается воздушным судам, произведенным иностранными производителями.

Как свидетельствуют многочисленные исследования и оценки, эмиссия парниковых газов от воздушного транспорта в целом очень незначительна и не может оказать значимого влияния на климатическую систему. Однако в последние годы отмечается интенсивный рост авиаперевозок в нашей стране и за рубежом и, следовательно, нагрузка на окружающую среду и климатическую систему может возрасти. Значимость проблематике оценки воздействия авиатранспорта придают намерения включить гражданскую авиацию в перечень нормативно-правовых инструментов смягчения антропогенного воздействия на климат. Поэтому уточнение количественных оценок атмосферных выбросов российских гражданских самолетов, выполненное в настоящей работе, является своевременным и актуальным. Оно составляет основу рекомендуемого автором мониторинга авиационных выбросов.

По результатам выполненного исследования можно сделать следующие **выводы**:

1. С начала 21 в. интенсивность гражданских грузовых и пассажирских авиаперевозок в пределах территории Российской Федерации выросла на 164% и 296% соответственно. Авиационные выбросы в атмосферу происходят в основном в планетарный пограничный слой и в верхнюю тропосферу. В части воздействия на окружающую среду и климат, приоритетными газообразными веществами из состава авиавыбросов являются парниковые газы диоксид углерода (CO_2), метан (CH_4), оксид диазота (N_2O), а также загрязняющие вещества, оказывающие косвенное воздействие на климат – углеводороды (C_nH_m), оксид углерода (CO), оксиды азота (NO_x) и диоксид серы (SO_2).

2. Выбросы в планетарный пограничный слой происходят во время взлета и посадки гражданских воздушных судов и, преимущественно, локализованы в зоне аэропортов. Выбросы в верхнюю тропосферу происходят во время крейсерского полета, и не являются локальными, а существенно распределены в ней, поскольку воздушные трассы пролегают практически над всеми участками суши территории Российской Федерации. Соответственно прямое и косвенное воздействие на окружающую среду и климат оказывается и в точке выброса, и повсеместно за

счет интенсивного перемешивания и дальнего переноса продуктов выбросов в атмосфере. Последствия выбросов различны в планетарном пограничном слое и в верхней тропосфере.

3. Разработанные в диссертации инновационные методы и алгоритмы расчета годовых авиационных выбросов парниковых газов и загрязняющих веществ, оказывающих косвенное воздействие на климат, основаны на технических характеристиках и авиационной работе, выполненной эксплуатируемыми в России судами гражданской авиации. Они позволяют оценить суммарные годовые авиационные выбросы в атмосферу приоритетных парниковых газов и загрязняющих веществ, а также осуществлять систематический расчетный мониторинг этих выбросов и влияния гражданского авиапарка на окружающую среду и климат в пределах территории России.

4. Выполненные в ходе диссертационного исследования расчеты показывают, что с 2000 по 2015 гг. в воздушное пространство России с выбросами российской гражданской авиации поступило в общей сложности 140,8 млн. т CO_2, 8,3 тыс. т CH_4, 4,1 тыс. т N_2O, 148,3 тыс. т C_nH_m, 516,3 тыс. т CO, 533,8 тыс. т NO_x и 45,1 тыс. т SO_2. Проведенный анализ авиационной работы свидетельствует о том, что за этот же период налет российских гражданских самолетов во внутреннем сообщении увеличился на 57%, а количество взлетно-посадочных циклов – на 9%.

5. Авиационные выбросы оказывают не одинаковое воздействие на верхнюю тропосферу и планетарный пограничный слой. За первые шестнадцать лет 21 в. выбросы парниковых газов в планетарный пограничный слой уменьшились на 11% (CO_2), 13% (N_2O) и 59% (CH_4), выбросы приоритетных загрязняющих веществ уменьшились на 48% (C_nH_m,), 7% (CO) и 21% (SO_2), а выброс NO_x увеличился на 24%. За этот же период выбросы в верхнюю тропосферу парниковых газов возросли на 73% (CO_2), 79% (N_2O) и 50% (CH_4), а приоритетных загрязняющих веществ – на 5% (C_nH_m), 69% (CO), 84% (NO_x) и 73% (SO_2). Таким образом, на всей территории Российской Федерации снизилась негативная нагрузка российского авиапарка на планетарный пограничный слой,

где расположены основные природные системы и населенные пункты. Этому способствовали обновление парка воздушных судов, оптимизация воздушно-транспортного движения и незначительный рост числа взлетов и посадок на фоне общего увеличения интенсивности авиаперевозок. В то же время возросшая интенсивность авиасообщения привела к заметному увеличению воздействия на верхнюю тропосферу.

6. Рассматриваемые в диссертации газообразные компоненты авиационных выбросов способны как усиливать парниковый эффект, так и оказывать охлаждающее воздействие вследствие химического превращения в вещества, отражающие коротковолновое солнечное излучение. Расчеты показывают, что с 2000 по 2015 гг. в воздушное пространство России от судов российской гражданской авиации поступило в общей сложности 142,2 млн. т CO_2-экв. парниковых газов и 6,5 млн. т CO_2-экв. газообразных загрязняющих веществ, продукты химического превращения которых содействуют охлаждению атмосферы. Таким образом, наведенный тепличный эффект от выбросов гражданских воздушных судов значительно сильнее создаваемого ими охлаждающего действия, но в целом эти выбросы пока еще не способны оказать существенного влияния на климат. Представленный в CO_2-эквиваленте суммарный годовой выброс парниковых газов и газообразных загрязняющих веществ, оказывающих косвенное воздействие на климат, в 2015 г. вырос по сравнению с 2000 г. на 46%, при этом выбросы в верхнюю тропосферу увеличились на 72%, а в планетарный пограничный слой – снизились на 12%.

7. Выбрасываемые гражданским воздушным транспортом России парниковые газы и газообразные загрязняющие вещества, оказывающие косвенное воздействие на климат, пока еще не способны существенно повлиять на состояние климатической системы. Но отмечаемый рост интенсивности работы российских гражданских воздушных судов потенциально может привести к негативным последствиям для состояния окружающей среды и климата. Поэтому целесообразно осуществление мониторинга выбросов и содержания продуктов сгорания авиатоплив в верхней тропосфере над территорией России, который

может быть реализован в рамках подготовки ежегодной национальной отчетности об антропогенных выбросах из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов.

Перспективы дальнейшей разработки темы диссертации связаны с определением потенциалов глобального потепления не охваченных данным исследованием парниковых газов и загрязняющих веществ, которые образуются при сгорании авиационного топлива. Включение в расчет этих веществ позволит повысить качество оценок воздействия гражданской авиации на окружающую среду и климат. Отдельный интерес представляет оценка влияния транзитных пролетов над территорией Российской Федерации, рассмотрение которых не являлось целью настоящего исследования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авиационные правила. Часть 34 Охрана окружающей среды. Эмиссия загрязняющих веществ авиационными двигателями. Нормы и испытания // МАК. – 2002. – 12 с.

2. Александров Э. Л. Озонный щит Земли и его изменения / Э. Л. Александров, Ю. А. Израэль, И. Л. Кароль, А. Х. Хргиан. – СПб.: Гидрометеориздат, 1992. – 288 с.

3. Асатуров М. Л. Загрязнение окружающей среды при авиатранспортных процессах: учеб. пособие / М. Л. Асатуров. – СПб.: Университет гражданской авиации. – 2010. – 94 с.

4. Большая энциклопедия транспорта. В 8 т. – М.: Машиностроение, 1995. – Т. 2: Авиационный транспорт. – 400 с.

5. Большедворская Л. Г. Единая транспортная система / Л. Г. Большедворская. – М.: МГГУ ГА. – 2000. – 92 с.

6. Борьба с шумом на производстве : Справочник / Под общей редакцией д-ра техн. наук проф. Е.Я. Юдина. – М.,1985. – 400 с.

7. Будыко М. И. Изменение климата / М. И. Будыко. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 280 с.

8. Бурико Ю. Я. Фундаментальные вопросы горения, теплообмена, образования вредных веществ применительно к рабочему процессу основных камер сгорания : Научный вклад в создание авиационных двигателей / Ю. Я. Бурико, С. А. Волков, В.Л. Попов и др. : под. ред. В.А. Скибина и В.И. Солонина. – М.: Машиностроение, 2000. – Кн. 2. – С. 296–305.

9. Волков С. А. Проблемы экологии авиационных двигателей / С. А. Волков // Двигатель. – 1999. – № 2. – С. 40–41.

10. Вредные химические вещества / Под ред. В.А. Филова. – Л.: Химия, 1990. – 732 с.

11. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – М.: Росгидромет, 2014. – 1008 с.

12. Вышинский В. В. Физические модели, численные и экспериментальные исследования аспектов авиационной экологии и безопасности полетов / В. В. Вышинский, А. Л. Стасенко // Труды МФТИ. – 2009. – Т. 1, №3. – С. 23–39.

13. Гинзбург А. С. Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат / А.С. Гинзбург, Д.П. Губанова, В.М. Минашкин // Российский химический журнал. – 2008. – Т. LII, № 5. – С. 112–119.

14. Гинзбург Е. С. Совершенствование пространственной организации авиационного транспорта России : автореф. дисс. … канд. геогр. наук : 25.00.24 / Е.С. Гинзбург. – Калининград : Рос. гос. ун-т им. И. Канта, 2009. – 19 с.

15. Грабар В. А. Оценка эмиссии парниковых газов от гражданской авиации в России / В. А. Грабар, М. Л. Гитарский, Т. М. Дмитриева, Е. П. Глуховская, Н. И. Хорькова, С. В. Киричков // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 1. – С. 30–38.

16. Гладильщикова А. А. Специальный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата «Глобальное потепление на 1,5ºС» / А. А. Гладильщикова, Т. М. Дмитриева, С. М. Семенов // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2018. – Т. 4. – С. 5–18.

17. Горбачев В. И. Перевозки растут, число аэропортов падает / В. И. Горбачев // Авиаглобус. – Март 2003. – С. 16–17.

18. ГосНИИ ГА (ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации»), 1991. Методика расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу двигателями основных типов воздушных судов гражданской авиации. – М .: Министерство гражданской авиации. – ГосНИИ ГА. – 1991. – 18 с.

19. ГОСТ 17.2.2.04–86 «Охрана природы. Атмосфера. Двигатели газотурбинные самолетов гражданской авиации. Нормы и методы определения выбросов загрязняющих веществ». – М.: Издательство стандартов, 1986. – 32 с.

20. ГОСТ 17228–87 «Самолеты пассажирские и транспортные. Допустимые уровни шума, создаваемого на местности». – М.: Издательство стандартов, 1987. – 15 с.

21. ГОСТ 17228–2014 «Самолеты пассажирские и транспортные. Допустимые уровни шума, создаваемого на местности». – М.: Стандартинформ, 2015. – 15 с.

22. ГОСТ 22283–88 «Шум авиационный. Допустимые уровни шума на территории жилой застройки и методы его измерения». – М.: Издательство стандартов, 1988. – 15 с.

23. ГОСТ 7.32-2001 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления». – М.: Стандартинформ, 2008. – 18 с.

24. ГОСТ Р 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила оформления». – М.: Стандартинформ, 2008. – 27 с.

25. ГОСТ Р ИСО 14064–1–2007. Газы парниковые. Часть 1. Требования и руководство по количественному определению и отчетности о выбросах и удалении парниковых газов на уровне организации. – М.: Стандартинформ, 2010. – 23 с.

26. ГОСТ Р ИСО 14965–2008 «Качество воздуха. Определение неметановых органических соединений. Метод предварительного криогенного концентрирования и прямого определения с помощью пламенно-ионизационного детектора». – М.: Стандартинформ, 2009. – 20 с.

27. Государственный доклад О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2004 году. – М.: Министерство природных ресурсов Российской Федерации – АНО «Центр международных проектов», 2005. – 494 с.

28. Дмитриева Т. М. Эмиссия парниковых газов от гражданской авиации / Т. М. Дмитриева, В. А. Грабар // Тезисы докладов Конференции молодых ученых, посвященной 100-летнему юбилею академика Е. К. Федорова. Москва, 16–18 ноября 2009 г. – Москва, 2009. – С. 24.

29. Грабар В. А. К оценке атмосферной эмиссии диоксида углерода от международных авиаперевозок из России / В. А. Грабар, Т. М. Дмитриева, М. Л. Гитарский // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем : сборник статей. – Москва, 2009. – Т. XXII. – С. 207–215.

30. Груза Г. В. Об изменениях температуры воздуха и атмосферных осадков на территории России в XX веке. Состояние и комплексный мониторинг

природной среды и климата. Пределы изменений / Г. В. Груза, М. Ю. Бардин, Э. Я. Ранькова, Э. И. Рочева, Ю. Ю. Соколов, О. Ф. Самохина, Т. И. Платова. – М.: Наука, 2001. – С. 19–39.

31. Гуревич Ф. М. Разработка перспективных малоэмиссионных камер сгорания / Ф. М. Гуревич, В. М. Захаров, В. М Сильверстов // Научный вклад в создание авиационных двигателей : под ред. В.А. Скибина и В.И. Солонина. – М.: Машиностроение, 2000. – Кн. 2. – С. 320–329.

32. Дмитриева Т. М. Анализ шагов Европейского союза по включению авиаперевозок в систему торговли выбросами парниковых газов / Т. М. Дмитриева // Авиационный экологический вестник. – 2009. – № 2 : Международная и отечественная практика снижения воздействия авиационного шума и выбросов загрязняющих веществ в районе аэропортов. Организация санитарно-защитных зон аэропортов : по материалам межведомственной научно-практической конференции Росавиации, Росаэронавигации, Роспотребнадзора : сборник статей. Москва, 04 марта 2009 г. – С. 99–103.

33. Дмитриева Т. М. Влияние полетов гражданской авиации на окружающую среду / Т. М. Дмитриева // Труды / Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова. – 2010. – Вып. 88. – С. 124–132.

34. Дмитриева Т. М. К оценке воздействия гражданской авиации на окружающую среду / Т. М. Дмитриева / Актуальные проблемы экологии и природопользования : сборник научных трудов. – 2009. – Вып. 11. – С. 178–181.

35. Дмитриева Т. М. Оценка выбросов в атмосферу загрязняющих веществ и парниковых газов самолетами гражданской авиации России / Т. М. Дмитриева // Метеорология и гидрология. – 2014. – № 9. – С. 41–48.

36. Дмитриева Т. М. Авиационные выбросы российской гражданской авиации при выполнении внутренних рейсов в 2000–2012 гг. и интегральная оценка их воздействия на климатическую систему / Т. М. Дмитриева, В. А. Грабар // Метеорология и гидрология. – 2017. – № 8. – С. 76–84.

37. Дмитриева Т. М. Атмосферные выбросы загрязняющих веществ и парниковых газов гражданской авиацией России [Электронный ресурс] /

Т. М. Дмитриева, В. А. Грабар // Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития : тезисы докладов всероссийской научной конференции. Москва, 20–22 марта 2017 г. – Москва, 2017. – С. 122–123. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_30312472_83741280.pdf (дата обращения: 10.09.2019).

38. Дмитриева Т. М. Об учете Вспомогательными органами Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН) эмиссии парниковых газов при транспортировке бункерного топлива / Т. М. Дмитриева, А. П. Метальников // Энергетическая политика, 2006. – Вып. 3. – С. 55–62.

39. Дубовкин Н. Ф. Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив : справочник / Н. Ф. Дубовкин, В. Г. Маланичева, Ю. П. Массур. – М.: Химия, 1985. – 240 с.

40. Иванов Ю. А. Камеры сгорания и экология / Ю. А. Иванов // Конверсия в машиностроении. –2000. – № 5. – С. 46–50.

41. Израэль Ю. А. Эффективный путь сохранения климата на современном уровне – основная цель решения климатической проблемы / Ю. А. Израэль // Метеорология и гидрология, 2005. – № 10. – С. 5–9.

42. Израэль Ю. А. Роль стратосферных аэрозолей в сохранении современного климата / Ю. А. Израэль, И. И. Борзенкова, Д. А. Северов // Метеорология и гидрология, 2007. – № 1. – С. 5–14.

43. Израэль Ю. А. Парниковый эффект и его возможное антропогенное усиление / Ю. А. Израэль, С. М. Семенов, В. И. Эскин // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2003. – Т. 19. – С. 7–20.

44. Кароль И. Л. Влияние полетов транспортной авиации мира на озоносферу и климат / И. Л. Кароль // Метеорология и гидрология. – 2000. – № 7. – С. 17–32.

45. Кароль И. Л. Оценки характеристик относительного вклада парниковых газов в глобальное потепление климата / И. Л. Кароль // Метеорология и гидрология. – 1996. – № 11. – С. 5–12.

46. Кароль И. Л. Моделирование маломасштабного влияния выбросов двигателей высотных самолетов на состав атмосферы / И. Л. Кароль, Ю. Э. Озолин // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 1995. – Т. 31, № 4. – С. 507–516.

47. Квитка В. Е. Нормирование и снижение шума самолетов и вертолетов / В. Е. Квитка, Б. Н. Меявичков, В. И. Токарев. – Киев: Высшая школа, 1989. – 208 с.

48. Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата. – Женева: Секретариат РКИК ООН–ЮНОГ, 2005. – 38 с.

49. Клименко В. В. Энергия, природа и климат / В. В. Клименко и др. – Москва, 1997. – 216 с.

50. Кобак К. И. Влияние изменений климата на природную зональность и экосистемы России. Изменения климата и их последствия / К. И. Кобак, Н. Ю. Кондрашева, И. Е. Турчинович. – СПб.: Наука, 2002. – С. 205–210.

510. Козлов Ю. С Экологическая безопасность автомобильного транспорта / Ю. С. Козлов, В. Н. Меньшова, Н. А. Святкин. – М.: АГАР, 2000. – 176 с.

52. Конвенция о международной гражданской авиации. – 9-е изд. – ICAO, 2006. – 51 с.

53. Кондратьев К. Я. Аэрозоль и климат: некоторые результаты и перспективы дистанционного зондирования 2. Тропосферный аэрозоль / К. Я. Кондратьев // Экологическая химия, 1998. – С. 145–163.

54. МГЭИК, 1997. Пересмотренные Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов 1996 г. / МГЭИК–ОЭСР–МЭА. – Париж, 1997. Т. 2. – 338 с.

55. МГЭИК, 2000. Руководящие указания по эффективной практике и учету факторов неопределенности в национальных кадастрах парниковых газов / МГЭИК–ОЭСР–МЭА. – Хайяма, 2000. – 562 с.

56. МГЭИК, 2006. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006.: Подготовлено Программой МГЭИК по

национальным кадастрам парниковых газов / Х. С. Игглестон, Л. Буэндиа, К. Мива, Т. Нгара, К. Танабе (ред.); МГЭИК – ИГЕС. – 2006. Т. 2. – 342 с.

57. МГЭИК, 2007: Изменение климата, 2007.: Обобщающий доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата / Р. К. Пачаури, А. Райзингер, и основная группа авторов (ред.) / МГЭИК. – Женева, 2007. –104 с.

58. Международные стандарты и рекомендуемая практика. Охрана окружающей среды. Приложение 16 к Конвенции о международной гражданской авиации. (Environmental Protection/ Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation) // Монреаль. – Квебек. – Канада. – 2-е изд. (с посл. поправками). – 2014. – 258 с.

59. Методика расчета выбросов загрязняющих веществ двигателями воздушных судов гражданской авиации : ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации» : ЗАО «Центр экологической безопасности гражданской авиации». – Москва, 2007. – 16 с.

60. Неретин А. С. Территориальная структура пассажирского авиационного транспорта в Европейской России / А. С. Неретин // Известия РАН. Серия географическая. – 2017. – № 6. – С. 19–38.

61. Николайкин Н. И. Анализ и оценка интенсивности химического загрязнения окружающей среды в Российской Федерации предприятиями гражданской авиации / Н. И. Николайкин, А. М. Матягина, Ю. В. Смирнова // Экология промышленного производства. – 2004. – Вып. 1. – С. 20–28.

62. Николайкин Н. И. Экология : Учеб. для вузов / Н. И. Николайкин, Н. Е. Николайкина, О. П. Мелехова. – 4-е изд. – М.: Дрофа, 2005. – 624 с.

63. Николайкин Н. И. Промышленная экология: Расчет выбросов загрязняющих веществ от воздушных судов : Пособие для практических занятий и дипломного проектирования / Н. И. Николайкин, Ю. В. Смирнова, Б. Н. Карпин. – М.: МГТУ ГА, 2006. – 58 с.

64. Николайкина Н. Е. Промышленная экология. Инженерная защита биосферы от воздействия транспорта : Учебное пособие для ВУЗов / Н. Е. Николайкина, Н. И. Николайкин, А.М. Матягина. – Москва, 2006. – 239 с.

65. Нормирование эмиссий двигателей воздушных судов: циркуляр ИКАО 134–А(94) // Монреаль–Канада: ИКАО. – 1977. – 39с.

66. Нормативы расхода топлива и технических скоростей на эксплуатацию воздушных судов. Указание Департамента воздушного транспорта РФ от 10.04.1996 г. ДВ–45/И. [Электронный ресурс] // СПб.: Кодекс-Мастер. – 1997–2005 г. – URL: //http:www.kodeks.net (дата обращения 15.07.1918).

67. Об утверждении «Методических положений по расчету топливно-энергетического баланса Российской Федерации в соответствии с международной практикой». Утверждено постановлением Госкомстата России № 46 от 23 июня 1999 г.

68. Опарин М. М. Будет ли в России отечественная криогенная авиация? / М. М. Опарин, В. В. Малышев // Военно-промышленный курьер : Общероссийская еженедельная газета. – 2005. – № 13.

69. Отчет некоммерческого партнерства «Безопасность полетов» за 2000–2003 годы : материалы к отчетно-выборному собранию коллективных членов Партнерства 9 июня 2004 года. – Москва, 2004. – 12 с.

70. Охрана окружающей среды в гражданской авиации / Под ред. В. Г. Ененкова. – М.: Машиностроение, 1992. – 320 с.

71. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – М.: Росгидромет, 2008. – Т. 1. Изменение климата. – 230 с.

72. Поповичева О. Б. Влияние авиации на атмосферу. Проблемы и перспективы исследований / О. Б. Поповичева, А. М. Старик, О. Н. Фаворский. – М.: ОИВТ РАН, препринт. – 1998. – № 8–427. – 78 с.

73. Постоев С. К. Современное состояние и возможности перевода вертолетов и самолетов региональной авиации на авиационное сконденсированное топливо – АСКТ : Сб. научных трудов ГосНИИГА / С. К. Постоев, В. П. Зайцев. – Москва, 2010. – № 311. – С. 119–124.

74. Почекаева Е. И. Авиационный городской шум как гигиеническая проблема. Региональные гигиенические проблемы и стратегия охраны здоровья населения : Научные труды Федерального научного центра гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана / Е. И. Почекаева. – Москва, 2004. – Вып. 10. – С. 175–179.

75. Почекаева Е. И. Здоровье населения и гигиеническая безопасность территорий, прилегающих к аэропортам / Е. И. Почекаева, И. Л. Винокур. – М., 2006. – 240 с.

76. Приложение 16 к Конвенции о международной гражданской авиации. Охрана окружающей среды. Международная организация гражданской авиации. – Монреаль. – Квебек. – Канада. – 3-е изд. – 2008. – Т. 2 : Эмиссия авиационных двигателей. – 118 с.

77. Пятое национальное сообщение Российской Федерации. Издание официальное / Под ред. Ю. А. Израэля, А.И. Бедрицкого, А.В. Фролова и др. [Электронный ресурс]. – 2010. – 196 с. – URL: http://unfccc.int/resource/ docs/natc/rus_nc5_resubmit.pdf (дата обращения 14.11.2018).

78. Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата. – Женева: Секретариат РКИК, ООН-ЮНОГ, 2005. – 41 с.

79. Распоряжение правительства Российской Федерации от 1 марта 2006 г. № 278–р. // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2009. – № 12. – С. 1429.

80. Ревокатова А. П. Технические возможности создания аэрозольного слоя в стратосфере с целью стабилизации климата / А. П. Ревокатова, А. Г. Рябошапко // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2015. – Т. XXVI, № 2. – С. 115–127.

81. Рекомендации по установлению зон ограничения жилой застройки в окрестностях аэропортов гражданской авиации из условий шума. – М.: Стройиздат, 1987. – 33 с.

82. Российский статистический ежегодник, 2017 : Стат. сб. : Росстат. – М., 2017. – 688 с.

83. Российская Федерация, 2017. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, за 1990–2015 гг. [Электронный ресурс] // Российская Федерация, Росгидромет. – 2017. – Т. 1–2. URL: http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_ submissions/items/10116.php (дата обращения 14.11.2018).

84. Саркисов А. А. Теория и расчет образования вредных выбросов в камерах сгорания ГТД / А. А. Саркисов, О. А. Рудаков // Пром. теплотехника. – 1999. – Т. 21, № 6. – С. 34–38.

85. Семенов С. М. Парниковые газы и современный климат Земли / С. М. Семенов // Метеорология и гидрология, 2004. – № 1. – С. 75–85.

86. СН 2.2.4/2.1.8 562 – 96 « Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки». – Москва : Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. – 19 с.

87. СНиП 11–12–77 «Защита от шума» Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 1978. – 52с.

88. Сравнительный анализ российских расчетных методик оценки выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух двигателями воздушных судов гражданской авиации и действующих зарубежных методик, включая методику EEA (EMEP/CORINAIR), и обоснование необходимости их гармонизации. Разработка исходных требований к обновленной модели расчета выбросов загрязняющих веществ авиадвигателям отечественных воздушных судов : Отчет ГосНИИГА по НИР № 3–02/31–10.42–02 (этапы 1 и 2). – Москва. – 2002.

89. Суворов Г. А. Гигиеническое нормирование производственных шумов и вибраций / Г. А. Суворов, Э. П. Денисов, Л. Н. Шкариков. – М.: Медицина, 2004. – 240 с.

90. Тараничев А. А. Анализ возможностей создания рыночных механизмов по снижению выбросов парниковых газов предприятиями авиационного сектора Российской Федерации / А. А. Тараничев // Сб. научных трудов ГосНИИ ГА. – М., 2010. – № 311. – С. 111–114.

91. Тархов С. А. Изменение связности пространства России (на примере авиапассажирского сообщения) / С. А. Тархов. – М.–Смоленск: Ойкумена, 2015. – 154 с.

92. Технический доклад Секретариата РКИК ООН FCCC/TP/2007/1 [Электронный ресурс]. – URL: https://unfccc.int/documents?f%5B0%5D=symbol%3Afccc/tp/2007/1 (дата обращения 14.11.2018).

93. Фрумин Г. Т. Экологическая химия и экологическая токсикология / Г. Т. Фрумин. – СПб: РГГМУ, 2002. – 204 с.

94. Характеристики воздушных судов, эксплуатируемых российскими авиаперевозчиками в 2010 г. : Ежегодник АТО. – М.: АТО, 2011. – С. 132–144.

95. Харин А. А. Возможности и особенности применения альтернативных топлив в авиационных двигателях / А. А. Харин, И. В. Шевченко, Л. С. Яновский // Авиационная техника. – 2002. – № 1. – С. 54–56.

96. Шишелова Т. И. Авиационный шум как экологический фактор среды обитания населения г. Иркутска / Т. И. Шишелова, О. О. Егорова, Т. В. Созинова. – Москва, 2004. – 133 с.

97. Ягодин Г. А. Будущее промышленности в свете концепции устойчивого развития. Экология и промышленность России / Г. А. Ягодин, Н. П. Тарасова. – Москва, 2001. – № 3. – С. 23–25.

98. Яновский Л. С. Горюче–смазочные материалы для авиационных двигателей / Л. С. Яновский, Н. Ф. Дубовкин, Ф. М. Галимов. – Казань: Мастер Лайн, 2002. – 400 с.

99. Яновский Л. С. Состояние и перспективы развития горюче-смазочных материалов для двигателей летательных аппаратов / Л. С. Яновский, Н. Ф. Дубовкин, Е. П. Федоров // Конверсия в машиностроении. – 2000. – № 5. – С. 87–94.

100. Яновский Л. С. Авиационная экология. Воздействие горюче–смазочных материалов на окружающую среду / Л. С. Яновский, А. А. Харин, И. В. Шевченко, В. П. Дмитренко. – М., 2004. – 179 с.

101. Airtraffic (SNAP Codes: 080501-080504). Emission Inventory Guidebook // Dec. 2001. – 90 p.

102. Bakwin P. S. Carbon monoxide budget in the northern hemisphere / P. S. Bakwin, P. P. Tans, P. C. Novelli // Geophysical Research Letters. – 1994. – Vol. 21. – P. 433–436.

103. Baughcum S. L. Aircraft emissions. /In: Atmospheric Effects of Subsonic Aircraft: Interim Rep., R. Friedl (ed.) / S. L. Baughcum // NASA Ref. Publicat. 1400. – 1997. – P. 5–26.

104. Brasseur G. P. European scientific assessment of the atmospheric effects of aircraft emissions / G. P. Brasseur, R.A. Cox, D. Hauglustaine, I. Isaksen, J. Lelieveld,

D. H. Lister, R. Sausen, U. Schumann, A. Wahner, P. Wiesen // Atmospheric Environment. – 1998. – P. 2329–2418.

105. Chulkyu L. SO_2 emissions and lifetimes: Estimates from inverse modeling using in situ and global, space -based (SCIAMACHY and OMI) observations / L. Chulkyu, V. M. Randall, A. van Donkelaar, L. Hanlim, R. R. Dickerson, J. C. Hains, N. Krotkov, A. Richter, K. Vinnikov, J. James // Journal of Geophysical Research. – Vol. 116. – 2011.

106. Climate change, 1994. Radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios. Intergovernmental Panel on Climate Change // Cambridge: University Press, 1995. –339 p.

107. Climate Change, 1995. The science of climate change: Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / J. T. Houghton, L. G.Meira Filho, B. A. Callandar, N. Harris, A. Kattenberg, K. Maskell, Eds. – Cambridge: University Press, 1996. – 572 p.

108. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley (eds.). – Cambridge : Cambridge University Press; NY : United Kingdom and New York, – 2013. – 1535 p.

109. Cofala J. Scenarios of global anthropogenic emissions of air pollutants and methane until 2030 / J. Cofala, M. Amann, Z. Klimont, K. Kupiainen, L. Höglund–Isaksson // Atmospheric Environment. – 2007. – 8486–8499 p.

110. Crutzen P.J. Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: A contribution to resolve a policy dilemma? / P. J. Crutzen // Clim. Change. – 2006. – Vol. 77, № 3–4. – P. 211–219.

111. Crutzen P. J. The changing photochemistry of the troposphere / P. J. Crutzen, P. H. Zimmermann // Tellus. – 1991. – Vol. AB43. – P. 136–151.

112. Dlugokencky E. Continuing decline in the growth rate of the atmospheric methane burden / E. Dlugokencky, K. Masarie, P. Lang, P. Tans // Nature. – 1998. – P. 447–450.

113. ECAC. Methodolgy for emissons calculations. – 2003. – 18 p.

114. Emissions and Dispersion Modeling System (EDMS) Reference Manual. Federal Aviation Administration, Office of Environment and Energy // FAA–AEE–01–01. – May 2001. – 147 p.

115. Environmental benefits associated with global aviation emissions and potential reduction from CNS/ATM measures // CAEP/5–IP/17. – 2000. – 131p.

116. European Environmental Agency, EMEP/CORINAIR [Электронный ресурс] // Atmospheric Emission Inventory Guidebook. – 2-nd edition. – 1999. – https://www.eea.europa.eu/publications/EMEPCORINAIR (дата обращения 11.10.2018).

117. Full Throttle Aerospace. – 2001. – Vol. 28, № 8. – P. 24–27.

118. Hayhurst A. N. Emissions of nitrous oxide from combustion sources, Department of Chemical Engineering / A. N. Hayhurst, A. D. Lawrence // Cambridge University, Pembroke Street, Cambridge. CB.2 3RA. U.K. 1992, Prog. Energy Combwt. / Sci. – 1992. – Vol. IS. – P. 529–552.

119. Houghton J. T. Climate Change 1995: The Science of Climate Change / J. T. Houghton, L. C. Meira Filho, el al. (eds.). – Cambridge : Cambridge Univ. Press, 1996. – 576 p.

120. ICAO Engine Exhaust Emissions DataBank, First Edition 1995, ICAO, Doc 9646– AN/943, ICAO Aircraft Engine Emissions DataBank [Электронный ресурс] // Issue 13 implemented on website, 1.10.2004. – URL:http://www.easa.europa.eu (дата обращения 14.11.2018).

121. ICAO, 2010. Aviation and Climate Change : ICAO Environmental Report // ICAO. – 2010. – 229 p.

122. IPCC, 1997. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories // IPCC/OECD/IEA. – Vol. 2. – 1997.

123. IPCC, 1999. Aviation and the Global Atmosphere. Special Report / J.E.Penner, D.H.Lister, D.J.Griggs, D.J.Dokken, M.McFarland (Eds.). – Cambridge : Cambridge University Press, 1999. – 373 p.

124. IPCC, 2000. Land Use, Land Use Change, and Forestry. A Special Report of the IPCC / R. Watson, I. Noble, B. Bolin, N. Ravindranath, D. Verardo, D. Dokken (Eds.). – Cambridge : Cambridge University Press, 2000. – 377 p.

125. IPCC, 2001: Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / R.T. Watson and the Core Writing Team (eds.). – Cambridge : Cambridge University Press; United Kingdom, and New York, NY, USA, 2001. – 398 p.

126. IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for national Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme / H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara and K. Tanabe (eds.). – Japan: IGES, 2006. – 20 p.

127. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T. F Stocker., D. Qin, G.–K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley (eds.). – Cambridge : Cambridge University Press; United Kingdom, and New York, NY, USA, 2013. – 1535 p.

128. Isaksen I. S. A. Atmospheric composition change: climate-chemistry interctions / I. S. A. Isaksen, C. Granier, G. Myhre, T.K. Berntsen, S.B. Dalsoren, M. Gauss, Z. Klimont, R. Benestad, P. Bousquet, W. Collins, T. Cox, V. Eyring, D. Fowler, S. Fuzzi, P. Jockel, P. Laj, U. Lohmann, M. Maione, P. Monks, A. S. H. Prevot, F. Raes, A. Richter, B. Rognerud, M. Schulz, D. Shindell, D. S. Stevenson, T. Storelvmo, W.-C. Wang, M. van Weele, M. Wild, D. Wuebbles // Atmospheric Environment. – 2009. – P. 5138–5192.

129. Jones P.D. Surface air temperature and its changes over the past 150 years / P. D. Jones, M. New, D. E. Parker, S. Martin, I. G. Rigor // Reviews of Geophysics. – 1999. – Vol. 37, is. 2. – P. 17 3–199.

130. Karcher B. Physicochemistry of aircraftt–generated liquid aerosols soot and ice particles. 1. Model description / B. Karcher // J. Geophys. Res. – 1998. – Vol. 103. – P. 17111–17128.

131. Karcher B. Physicochemistry of aircraftt-generated liquid aerosols soot and ice particles. 2. Comparison with observations and sensitivity studies / B. Karcher,

R. Busen, A. Petzold, F. P. Schroder, U. Schumann, E. J. Jensen // J. Geophys. Res. – 1998. – Vol. 103. – P. 17129–17147.

132. Karol I. L. How the account of Effective Emission Index of subsonic aircraft exhausts changes the distribution of gas composition in the north temperate belt / I. L Karol, A. A. Kiselev // Atmospheric effect of aircraft emissions in the upper troposphere and lower stratosphere. / I. S. A. Isaksen, B. Rognerud, G. T. Amanatidis (Eds.). Air Pollution Research Report. – 2001. – № 77. – P. 294–297.

133. Karol I. L. Plume Transformation Index (PTI) as a factor in the Effective Emission Indices of the subsonic aircraft exhausts and its dependence on the ambient conditions / I. L. Karol, Yu. E. Ozolin, A. A. Kiselev, Rozanov, E. V. Plum // Geophys. Res. Lett. – 1999. – Vol. 27, № 3. – P. 373– 376.

134. Keihl J. T. Earth's annual global mean energy budget / J. T. Keihl, K. E. Trenberth // Bulletin of American Meteorological Society. – 1997. – Vol. 78, №. 2. – P. 197–208.

135. Key GHG Data. Greenhouse gas emissions data for 1990-2003 submitted to the United Nations Framework Convention on Climate Change // UNFCCC. – 2005. – 166 p.

136. Kiselev A. A. Modeling of the long-term tropospheric trends of hydroxyl radical for the Northern Hemisphere / A. A. Kiselev, I. L. Karol // Atmospheric Environment. – 2000. – Vol. 34, № 29–30. – P. 5271–5282.

137. Kroeze C. Closing the global N_2O budget: a retrospective analysis 1500-1994 / C. Kroeze, A. Mosier, L. Bouwman // Global Biogeochemical Cycles. – 1999. – Vol. 3, № 1. – P. 1–8.

138. Lee D. S. Aviation and global climate change in the 21st century / D. S. Lee, D. W. Fahey, P. M. Forster, P. J. Newton, R. C. N. Wit, L. L. Lim., B. Owen, R. Sausen / Atmospheric Environment. – 2009. – № 43. – P. 3520–3537.

139. Lelieveld J. Changing concentration, lifetime and climate forcing of atmospheric methane / J. Lelieveld, P. Crutzen, F. J Dentener // Tellus. – 1998. – Vol. 5, № 2. – P. 128–150.

140. Levy H. II Simulated tropospheric NO_x: Its evaluation, global distribution and individual source contributions / H. Levy, W. J. Moxim, A. A. Klonecki, P. S. Kasibhatla // J. Geophys. Res. – 1999. – № 104. – P. 26279–26306.

141. Mann M. E. Northern Hemisphere temperatures during the past millennium: Interferences, uncertainties and limitations / M. E. Mann, R. S. Bradley, M. K. Hudges // Geophysical Research Letters. – 1999. – Vol. 26, № 6. – P. 759–762.

142. Market-based measures report from WG5 to the fifth meeting of the Committee on Aviation Environmental Protection : Paper CAEP/5–IP/22. – 2001. – 109 p.

143. Miake-Lye R. C. Plume and wake dynamics, mixing and chemistry behind an HSCT aircraft / R. C. Miake-Lye, M. Martinez-Sanchez, R. C. Brown, C. E. Kolb // Journal of Aircraft. – 1993. – Vol. 30, № 4. – P. 467–479.

144. Myhre G. Anthropogenic and natural radiative forcing supplementary material [Электронный ресурс] / G. Myhre // Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley (eds.). – 2013. – 44 p. – URL: http://www.climatechange2013.org (дата обращения 15.11.2018).

145. Owen, B. Flying into the future: Aviation emissions scenarios to 2050 / B. Owen, D. S. Lee, L. Lim // Environmental Science and Technology. – 2010. – Vol. 44. – P. 2255–2260.

146. Prather M. J. Measuring and modeling the lifetime of nitrous oxide including its variability / M. J. Prather, J. Hsu, N. M. DeLuca et al. // Journal of Geophysical Research Atmospheres. – Vol. 120, № 11. – P. 5693–5705.

147. Paramonov S. Sulphur and nitrogen compounds in air and precipitation over the former Soviet Union in 1980–1995 / S. Paramonov, A. Ryaboshapko, S. Gromov, L. Granat, H. Rodhe / Stockholm University – International Meteorological Institute. – Stockholm, 1999. – 44 p.

148. Ramanathan V. Climate and the Earth's radiation budget / V. Ramanathan, B. R. Barkstrom, E. F. Harrison // International Agrophysics. – 1989. – Vol. 42, № 5. – P. 171–181.

149. Scientific assessment of climate change – Report of Working Group I / J. T. Houghton, G. J. Jenkins, J. J. Ephraums (Eds.) // First Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.– Cambridge : Cambridge UniversityPress. – 1990. – 365 p.

150. Seinfeld J. H. Atmospheric Chemistry And Physics / J. H. Seinfeld, S. N. Pandis // From Air Pollution to Climate Change. – Second Edition. – John Wiley & Sons, Inc., 2006. – 1248 p.

151. Skeie R. B. Global temperature change from the transport sectors: Historical development and future scenarios / R. B. Skeie, J. Fuglestvedt, T. Bernsten, M. T. Lund, G. Myhre, K. Rypdal // Atmospheric Environment. – 2009. – Vol. 43, № 39.– P. 6260–6270.

152. Smith S. J. Anthropogenic sulfur dioxide emissions: 1850–2005 / S. J. Smith, J. Aardenne van, Z. Klimont, R. J. Andres, A. Volke, S. D. Arias // Atmos. Chem. Phys. – 2011. – Vol. 11, iss. 3 – P. 1101–1116.

153. The IATA Technology Roadmap Report. – 3rd Edition. – IATA, 2009. – 50 p.

154. UNEP, 2011 [Электронный ресурс]. – URL: http://www.unep.org/publications/ebooks/bridgingemissionsgap (дата обращения 15.11.2018).

155. USEPA, 2004. Update of methane and nitrous oxide emission factors for on–highway vehicles // Report EPA420–P–04–016, United States Environmental Protection Agency. – Washington DC, 2004. – 39 p.

156. USEPA, 2012. Global Anthropogenic Non-CO_2 Greenhouse Gas Emissions // EPA 430–R–12– 006, United States Environmental Protection Agency. – Washington DC, 2012. – 190 p.

157. Wallinghton T. J. Emissions of CO_2, CO, NO_x, HC, PM, HFC-134a, N_2O and CH_4 from the global light duty vehicle fleet / T. J. Wallinghton, J. L. Sullivan, M. D. Hurley // Meteorologische Zeitschrift. – 2008. – Vol. 17, № 2. – S. 109–116.

158. WBCSD (2004) [Электронный ресурс]. – URL: http://www.wbcsd.org/ web/ publications/mobility/smp-model-document.pdf (дата обращения 15.11.2018).

159. Wiesen P. Abiotic nitrous oxide sources: Chemical industry and mobile and stationary combustion systems / P. Wiesen // Nitrous oxide and climate change / K. Smith (Ed.). – Earthscan, London, 2010. – P. 63 – 84.

160. Wiesen P. Nitrous oxide and methane emissions from aero engines / P. Wiesen, J. Kleffmann, R. Kurtenbach, K. H. Becker // Geophysical Research Letters. – 1994. – Vol. 21. – P. 2027–2030.

161. Wiesen P. Emission of nitrous oxide and methane from aero engines: monitoring by tunable diode laser spectroscopy / P. Wiesen, J. Kleffmann, R. Kurtenbach, K. H. Becker // Infrared Physics and Technology. – 1996. – Vol. 37, № 1. – P. 75–81.

162. WMO, 2007. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006, Global Ozone Research and Monitoring Project // World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland. – 2007. – Report № 50. – 572 p.

163. Wuebbles D. J. Atmospheric Methane: trends and impacts / D. J. Wuebbles, K. Hayhoe, van J. Ham, A. P. M. Baede, L.A. Meyer, R. Ybema (Eds.) // Non-CO_2 greenhouse gases: scientific understanding, control and implementation Proceedings of the Second International Symposium / Kluwer Academic Publishers. – 2000. – P. 1–44.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Расчетные данные

Таблица А.1 – Величины удельных коэффициентов выбросов на этапах взлетно-посадочного цикла (EF_{LTOx}, кг/ВПЦ) и крейсерского полета (EF_{GHG}, кг/ТДж), использованные для расчета выбросов в атмосферу парниковых газов гражданскими воздушными судами (МГЭИК, 1997; МГЭИК, 2006)

Тип воздушного судна	**Коэффициенты эмиссии ПГ, кг/ВПЦ**			**Коэффициенты эмиссии ПГ на крейсерском полете, кг/ТДж**		
	CO_2	**CH_4**	**N_2O**	**CO_2**	**CH_4**	**N_2O**
A310	4760	0,63	0,2	71500	0,5	2
A319	2310	0,06	0,1	71500	0,5	2
A320	2440	0,06	0,1	71500	0,5	2
A321	3020	0,14	0,1	71500	0,5	2
B732	2740	0,45	0,1	71500	0,5	2
B733	2480	0,08	0,1	71500	0,5	2
B734	2480	0,08	0,1	71500	0,5	2
B735	2480	0,08	0,1	71500	0,5	2
B737	2460	0,09	0,1	71500	0,5	2
B738	2780	0,07	0,1	71500	0,5	2
B742	11370	1,82	0,4	71500	0,5	2
B743	11080	0,27	0,4	71500	0,5	2
B744	10240	0,22	0,3	71500	0,5	2
B752	4320	0,02	0,1	71500	0,5	2
B753	4630	0,01	0,1	71500	0,5	2
B762	4620	0,33	0,1	71500	0,5	2
B763	5610	0,12	0,2	71500	0,5	2
B772	8100	0,07	0,3	71500	0,5	2
B773	8100	0,07	0,3	71500	0,5	2
Ан2	3150	0,4	0,1	69300	0,5	2

Окончание таблицы А.1

Тип воздушного судна	Коэффициенты эмиссии ПГ, кг/ВПЦ			Коэффициенты эмиссии ПГ на крейсерском полете, кг/ТДж		
	CO_2	CH_4	N_2O	CO_2	CH_4	N_2O
Ан3	3150	0,4	0,1	71500	0,5	2
Ан12	3150	0,4	0,1	71500	0,5	2
Ан24	3150	0,4	0,1	71500	0,5	2
Ан26	3150	0,4	0,1	71500	0,5	2
Ан28	3150	0,4	0,1	71500	0,5	2
Ан38	3150	0,4	0,1	71500	0,5	2
Ан124	7560	7	0,2	71500	0,5	2
Ан140	7560	7	0,2	71500	0,5	2
Ан148	7560	7	0,2	71500	0,5	2
Ил18	2680	0,3	0,1	71500	0,5	2
Ил62	3150	0,4	0,1	71500	0,5	2
Ил76	3150	0,4	0,1	71500	0,5	2
Ил78М	3150	0,4	0,1	71500	0,5	2
Ил86	7900	1,5	0,2	71500	0,5	2
Ил96	7900	1,5	0,2	71500	0,5	2
Ил103	2680	0,3	0,1	69300	0,5	2
Ил114	2680	0,3	0,1	71500	0,5	2
Су95	7900	1,5	0,2	71500	0,5	2
Ту134	2930	1,8	0,1	71500	0,5	2
Ту154	5960	1,32	0,2	71500	0,5	2
Ту204	7900	1,5	0,2	71500	0,5	2
Як18	3150	0,4	0,1	69300	0,5	2
Як40	3150	0,4	0,1	71500	0,5	2
Як42	2880	0,25	0,1	71500	0,5	2

Таблица А.2 – Удельные величины El_i, г/кг, использованные для расчета выбросов загрязняющих веществ при осуществлении гражданскими воздушными судами взлетно-посадочного цикла (ICAO, 1995)

Тип воздушного судна	Взлет			Набор высоты			Снижение			Руление		
	C_nH_m	CO	NO_x	C_nH_m	CO	NO_x	C_nH_m	CO	NO_x	C_nH_m	CO	NO_x
A319	0,1	4,48	13,51	0,2	12,18	10,41	0,2	17,75	10,32	3,4	46,1	3,9
A320	0,1	1,6	16,61	0,1	4,9	12,58	11,4	43,8	6,13	2,2	37,1	4,49
A321	0,05	0,54	30,9	0,02	0,25	21,83	0,05	2,14	9,56	1,1	25,59	4,6
B732	0,21	0,93	24,5	0,27	1,08	16	0,55	2,68	8	1,33	10,7	3,2
B733	0,04	0,9	17,7	0,05	0,95	15,5	0,08	3,8	8,3	2,28	34,4	3,9
B737	0,01	0,6	20,5	0,01	0,5	17,4	0,01	3,2	9,5	3,1	25,9	4,3
B738	0,01	0,4	25,3	0,01	0,6	20,5	0,01	2,2	10,1	2,4	22	4,4
B742	0,6	0,5	36,5	0,7	0,5	29,7	1	4,3	9,5	21,8	61,8	3,6
B744	0,08	0,52	27,73	0,09	0,52	21,07	0,2	2,21	9	9,88	44,32	3,78
B752	0,02	0,33	29,41	0,02	0,34	23,96	0,11	1,95	9,77	1,92	22,36	4,1
B753	0,02	0,33	29,41	0,02	0,34	23,96	0,11	1,95	9,77	1,92	22,36	4,1
B762	0,29	1	29,8	0,29	1,1	25,6	0,47	3,1	10,3	6,29	28,2	3,4
B763	0,29	1	29,8	0,29	1,1	25,6	0,47	3,1	10,3	6,29	28,2	3,4
B773	0,02	0,27	57,52	0,02	0,31	41,17	0,04	0,55	12,74	0,69	11,94	4,48

Окончание таблицы А.2

Тип воздушного судна	Взлет			Набор высоты			Снижение			Руление		
	C_nH_m	CO	NO_x	C_nH_m	CO	NO_x	C_nH_m	CO	NO_x	C_nH_m	CO	NO_x
Ил62	0,3	2,8	16,3	0,4	3,7	12,6	1,2	11,8	5,1	10,5	54	2,7
Ил76	0,7	2,2	16,5	0,8	2,8	13,5	2,7	15,4	6,3	13,3	62,4	3,3
Ил86	0,5	3,9	12,8	0,6	4,2	12,1	1,2	9,3	5,1	52	54,4	12,7
Ил96	0,12	0,35	37	0,12	0,4	31,5	0,2	0,9	11,8	0,3	6,9	5,8
Ту134	0,12	2,7	19,1	0,14	3,2	16,3	1,5	14,5	7	43,6	60,3	3,6
Ту154	0,3	2,8	16,3	0,4	3,7	12,6	1,2	11,8	5,1	10,5	54	2,7
Ту204	0,12	0,35	37	0,12	0,4	31,5	0,2	0,9	11,8	0,3	6,9	5,8

Таблица А.3 – Удельные величины расхода топлива на различных режимах работы двигателя G_{Ti}, кг/ч, использованные для расчета выбросов загрязняющих веществ при осуществлении гражданскими воздушными судами взлетно-посадочного цикла (МГЭИК-ОЭСР-МЭА, 1997; АТО, 2011; ICAO, 1995)

Тип воздуш-ного судна	**Тип двигателя**	**Кол-во двигателей**	**Удельные расходы топлива на ВПЦ кг/ч на воздушное судно (с учетом числа двигателей)**			
			Взлет	**Набор высоты**	**Сниже-ние**	**Руление**
A310	PW JT9D-7R4D1/ GE CF6-80A3/ GE CF6-80C2A2/ PW 4152/GE CF6-80C2A8/ PW 4156A	2	14796	12081,6	4746,96	1478,88
A319	CFM56-5B/IAE V2500-A5	2	9784,8	8013,6	2620,8	842,4
A320	CFM56-5B/IAE V2500-A5	2	9784,8	8013,6	2620,8	842,4
A321	CFM56-5B/IAE V2500-A5	2	9784,8	8013,6	2620,8	842,4
B732	PW JT8D	2	9828	7538,4	2573,28	1063,44
B734	CFM56-3B-2	2	7603,2	6105,6	2260,8	856,8
B735	CFM56-3B-1	2	6811,2	5702,4	1656	820,8
B737	CFM56-7B20	2	6573,6	5479,2	1972,8	720
B742	PW JT9D-7R4G2/GE CF6-50E2/RR RB211-524D4	4	34977,6	27072	9489,6	3224,16
B743	PW JT9D-7R4G2/GE CF6-80C2B1/RR RB211-524D4	4	34977,6	27072	9489,6	3224,16
B744	PW4056/GE CF6-80C2B1F/CF6-80C2B5F/RR RB211-524G/RR RB211-524H	4	35265,6	28526,4	9316,8	2707,2
B763	GE CF6-80A/GE CF6-80C2/PW 4062	2	15444	12924	4428	1080

Окончание таблицы А.3

Тип воздуш-ного судна	Тип двигателя	Кол-во двигателей	Удельные расходы топлива на ВПЦ кг/ч на воздушное судно (с учетом числа двигателей)			
			Взлет	Набор высоты	Сниже-ние	Руление
B773	PW 4090/PW4098/RR trent 892	2	28267,2	21571,2	7048,8	2433,6
Ил62	Д-30КУ	4	21888	18720	7200	3096
Ил76	Д-30КП-2	4	24048	20448	7056	3024
Ил86	НК-86	4	34560	23040	8352	3024
Ил96	ПС-90А	4	25041,6	20606,4	7041,6	2563,2
Ту134	Д-30	2	8280	7020	2520	936
Ту154	Д-30КУ-154	3	15336	11880	4536	2235,6
Ту204	ПС-90А	2	12520,8	10303,2	3520,8	1281,6

Таблица А.4 – Удельные величины выбросов $EI_{кр}$, кг/т, использованных для расчета выбросов загрязняющих веществ во время крейсерского полета гражданских воздушных судов (МГЭИК, 1997; МГЭИК, 2006)

Тип воздушного судна	**C_nH_m**	**CO**	**NO_x**	**SO_2**
A310	2,7	5	12,2	1,00
A319	2,7	5	11,6	1,00
A320	0,7	7	12,9	1,00
A321	0,7	7	16,1	1,00
B733	0,7	7	11	1,00
B734	0,7	7	11	1,00
B735	0,7	7	11	1,00
B742	2,7	5	12,8	1,00
B743	2,7	5	15,2	1,00
B744	2,7	5	12,4	1,00
B752	2,7	5	11,8	1,00
B753	2,7	5	9,8	1,00
B762	2,7	5	13,3	1,00
B763	2,7	5	13,3	1,00
B772	2,7	5	14,4	1,00
B773	2,7	5	14,4	1,00
Ан2	0,7	7	11,00	1,00
Ан3	0,7	7	11,00	1,00
Ан12	0,7	7	11,00	1,00
Ан24	0,7	7	11,00	1,00
Ан26	0,7	7	11,00	1,00
Ан28	0,7	7	11,00	1,00
Ан38	0,7	7	11,00	1,00
Ан124	2,7	5	17,00	1,00

Окончание таблицы А.4

Тип воздушного судна	**C_nH_m**	**CO**	**NO_x**	**SO_2**
Ан140	2,7	5	17	1,00
Ан148	2,7	5	17,00	1,00
Ил62	2,7	5	17	1,00
Ил76	2,7	5	17	1,00
Ил103	0,7	7	11	1,00
Ил114	2,7	5	17	1,00
Ту134	2,7	5	8,5	1,00
Ту154	2,7	8	9,1	1,00
Ту204	2,7	8	17	1,00
Як18	0,7	7	11	1,00
Як40	0,7	7	11	1,00
Як42	0,7	7	15,60	1,00

Таблица А.5 – Удельные выбросы парниковых газов в эквиваленте CO_2 в детализации по отдельным типам воздушных судов на тонну израсходованного топлива, т CO_2-экв./т, и на тонну максимального взлетного веса, тыс. т CO_2-экв./т.

Тип воздушного судна	**Выбросы парниковых газов на тонну израсходованного топлива, т CO_2-экв./т**	**Выбросы парниковых газов на тонну максимального взлетного веса, тыс. т CO_2-экв./т**
A310	3,33	7,57
A319	3,65	83,88
A320	3,46	101,19
A321	3,54	19,11
B732	5,39	3,11
B733	3,80	10,62
B734	3,60	24,13
B735	3,84	125,03
B737	3,37	8,08
B742	0,09	0,12
B743	8,05	0,03
B752	3,42	15,59
B753	4,00	0,00
B762	3,19	5,61
B763	3,18	20,92
B772	3,15	3,86
Ан2	19,81	5,39
Ан3	12,29	1,23
Ан12	4,08	29,52
Ан24	10,20	265,80
Ан26	6,21	114,78
Ан28	2,32	43,81

Окончание таблицы А.5

Тип воздушного судна	**Выбросы парниковых газов на тонну израсходованного топлива, т CO2-экв./т**	**Выбросы парниковых газов на тонну максимального взлетного веса, тыс. т CO2-экв./т**
Ан38	12,13	8,50
Ан72	4,85	26,17
Ан124	1,37	1,12
Ан140	9,88	5,64
Ил18	4,05	5,94
Ил62	3,07	31,28
Ил76	3,13	36,04
Ил78М	3,48	0,72
Ил86	3,64	12,62
Ил96	3,25	9,63
Ил114	7,56	0,76
Су95	6,94	10,46
Ту134	23,97	215,90
Ту154	31,61	330, 21
Ту204	7,26	28,80
Як40	43,46	199,14
Як42	8,61	80,76

Таблица А.6 – Сравнительный анализ удельных эквивалентных выбросов парниковых газов и газообразных загрязняющих веществ на тонну топлива, израсходованного гражданским воздушным судном (средние за шестнадцатилетний период величины)

Тип воздушного судна	**Выбросы парниковых газов на тонну израсходованного топлива, т/т**	**Выбросы ПГ на тонну максимального взлетного веса ВС, тыс. т/т**	**Выбросы ЗВ на тонну максимального взлетного веса ВС, тыс. т/т**
A310	3,33	7,57	0,55
A319	3,65	83,88	5,54
A320	3,46	101,19	7,36
A321	3,54	19,11	1,73
B732	5,39	3,11	0,18
B733	3,80	10,62	0,64
B734	3,60	24,13	1,51
B735	3,84	125,03	7,54
B737	3,37	8,08	0,56
B742	0,09	0,12	0,01
B743	8,05	0,03	0,00
B752	3,42	15,59	1,05
B753	4,00	0,00	0,00
B762	3,19	5,61	0,43
B763	3,18	20,92	1,59
B772	3,15	3,86	0,32
Ан2	19,81	5,39	0,29
Ан3	12,29	1,23	0,07
Ан12	4,08	29,52	1,78
Ан24	10,20	265,80	14,91
Ан26	6,21	114,78	6,61
Ан28	2,32	43,81	2,38

Окончание таблицы А.6

Тип воздушного судна	**Выбросы парниковых газов на тонну израсходованного топлива, т/т**	**Выбросы ПГ на тонну максимального взлетного веса ВС, тыс. т/т**	**Выбросы ЗВ на тонну максимального взлетного веса ВС, тыс. т/т**
Ан38	12,13	8,50	0,46
Ан72	4,85	26,17	2,00
Ан124	1,37	1,12	0,11
Ан140	9,88	5,64	0,43
Ил18	4,05	5,94	0,38
Ил62	3,07	31,28	3,12
Ил76	3,13	36,04	3,67
Ил78М	3,48	0,72	0,07
Ил86	3,64	12,62	1,21
Ил96	3,25	9,63	0,95
Ил114	7,56	0,76	0,06
Су95	6,94	10,46	1,00
Ту134	23,97	215,90	11,36
Ту154	31,61	330,21	16,30
Ту204	7,26	28,80	2,54
Як40	43,46	199,14	10,99
Як42	8,61	80,76	6,69