



Совет РАН по проблемам климата Земли

Метан и климатические изменения: научные проблемы и технологические аспекты

Под редакцией
академика РАН В.Г. Бондура,
академика РАН И.И. Мохова,
члена-корреспондента РАН А.А. Макоско



МОСКВА, 2022



RAS Council on Earth Climate Problems

Methane and climate change: scientific problems and technological aspects

Edited by
academician of the RAS V.G. Bondur,
academician of the RAS I.I. Mokhov,
correspondent member of the RAS A.A. Makosko



MOSCOW, 2022

УДК 539.1+54.0+553

ББК 31.4

М 54

Метан и климатические изменения: научные проблемы и технологические аспекты. – М.: Российская академия наук, 2022 / Под ред. академика РАН **В.Г. Бондура**, академика РАН **И.И. Мохова**, члена-корреспондента РАН **А.А. Маковского**.

Книга, подготовленная под эгидой Совета РАН по проблемам климата Земли, содержит материалы ведущих ученых страны по актуальным вопросам определения влияния метана на климатические изменения, основанные на обширном перечне научных публикаций и исследованиях авторов. Рассмотрены источники и стоки метана, представлены количественные оценки соотношения естественных (природных) и антропогенных выбросов в атмосферу метана в России и в мире. Выполнен анализ роли метана в атмосферных фотохимических процессах с оценкой современных изменений концентрации метана в атмосфере и их причин. Особое внимание уделено выбросам метана в Арктической зоне, включая эмиссию метана из многолетнемерзлых болот России. Представлены результаты сравнительного анализа систем коэффициентов, используемых при определении эмиссии метана в атмосферу в национальных кадастрах. В том числе представлены соответствующие коэффициенты для производственных процессов нефтяной и газовой промышленности. Рассмотрены новые метрики для оценки выбросов парниковых газов. Особое внимание уделено факторам, влияющим на глобальные и региональные изменения климата с оценкой роли антропогенных выбросов метана в атмосферу, в том числе с использованием моделей земной системы Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН и Института вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН.

Книга предназначена как для специалистов – представителей профильных ведомств и организаций реального сектора экономики, так и для широкого круга специалистов, научных работников, профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов образовательных учреждений, специализирующихся в данных областях.

Methane and climate change: scientific problems and technological aspects. – Moscow: Russian Academy of Sciences, 2022 / Ed. by academician of the RAS **V.G. Bondur**, academician of the RAS **I.I. Mokhov** and correspondent member of the RAS **A.A. Makosko**.

The book, prepared under the auspices of the RAS Council on Earth Climate Problems, contains materials from the country's leading scientists on topical issues of determining the impact of methane on climate change, based on an extensive list of scientific publications and research by the authors. The sources and sinks of methane are considered, quantitative estimates of the ratio of natural (natural) and anthropogenic emissions of methane into the atmosphere in Russia and in the world are presented. An analysis of the role of methane in atmospheric photochemical processes was performed with an assessment of modern changes in the concentration of methane in the atmosphere and their causes. Particular attention is paid to methane emissions in the Arctic zone, including methane emissions from permafrost swamps in Russia. The results of a comparative analysis of the systems of coefficients used in determining methane emissions into the atmosphere in national inventories are presented. Including the corresponding coefficients for the production processes of the oil and gas industry. New metrics for estimating greenhouse gas emissions are considered. Particular attention is paid to the factors influencing global and regional climate changes with an assessment of the role of anthropogenic methane emissions into the atmosphere, including using models of the Earth system of the Institute of Atmospheric Physics named after A.M. Obukhov RAS and the Institute of Computational Mathematics named after G.I. Marchuk RAS.

The book is intended both for specialists – representatives of relevant departments and organizations of the real sector of the economy, and for a wide range of specialists, researchers, faculty, graduate students and students of educational institutions specializing in these areas.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Бондур В.Г. (председатель),
академик РАН

Аксютин О.Е.,
член-корреспондент РАН

Володин Е.М.,
доктор физико-математических наук

Голицын Г.С.,
академик РАН

Елисеев А.В.,
доктор физико-математических наук

Ишков А.Г.,
доктор химических наук

Макоско А.А. (заместитель председателя),
член-корреспондент РАН

Мохов И.И.,
академик РАН

Нахутин А.И.,
кандидат физико-математических наук

Романов К.В.,
кандидат экономических наук

Скороход А.И.,
кандидат географических наук

АВТОРСКИЙ КОЛЛЕКТИВ

Бондур В.Г., академик РАН (введение, разд. 1, подразд. 2.3, выводы, общ. ред.,
руководитель);

Голицын Г.С., академик РАН (разд. 1, зам. руководителя);

Мохов И.И., академик РАН (введение, выводы по разд., общ. ред.,
зам. руководителя);

Аксютин О.Е., член-корреспондент РАН (разд. 3, 4, подр. 5.1, зам.
руководителя);

Макоско А.А., член-корреспондент РАН (сост., введение, выводы по разд.,
общ. ред., зам. руководителя);

Аржанов М.М., кандидат физико-математических наук (подразд. 2.1);

Володин Е.М., доктор физико-математических наук (подразд. 5.3);

Гинзбург В.А., кандидат географических наук (разд. 3, подразд. 4.2);

Говор И.Л., (разд. 3, подразд. 4.2);

Грабар В.А., кандидат биологических наук (разд. 3, подразд. 4.2);

Денисов С.Н., кандидат физико-математических наук (подразд. 2.2, 4.1, 5.2);

Елисеев А.В., доктор физико-математических наук (подразд. 1.1, 1.3, 5.1);

Ишков А.Г., доктор химических наук (разд. 3, 4, подр. 5.1);

Кострыкин С.В., кандидат физико-математических наук (подразд. 5.3);

Моисеенко К.Б., кандидат физико-математических наук (подразд. 1.4);

Нахутин А.И., кандидат физико-математических наук (разд. 3, подразд. 4.2);

Панкратова Н.В., кандидат физико-математических наук (подразд. 1.2);

Попов Н.В., (разд. 3, подразд. 4.2);

Романов К.В., кандидат экономических наук (разд. 3, 4, подр. 5.1);

Скорород А.И., кандидат географических наук (подразд. 1.2, 1.4);

Феоктистова Н.В., (подразд. 2.3);

Черепанова Е.В., (подразд. 2.3).

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

ЗИЗЛХ	– землепользование, изменение землепользования и лесного хозяйства
ЗС	– зона стабильности
КМ ИФА РАН	– климатическая модель ИФА им. А.М. Обухова РАН
ЛОС	– летучие органические соединения
МВА	– моря восточной Арктики
МГ	– метангидраты
МГЭИК	– Межправительственная группа экспертов по изменению климата
МЛП	– малый ледниковый период
ПГ	– парниковые газы
РКИК ООН	– Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата
ТХМ	– транспортная фотохимическая модель
ФХС	– фотохимическая система
BU	– bottom-up (снизу вверх)
GEOS-chem	– Global Earth Observation chemical-transport model
TD	– top-down (сверху вниз)

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	14
1. ЦИКЛ МЕТАНА И ЕГО СОДЕРЖАНИЕ В АТМОСФЕРЕ	20
1.1 ИСТОЧНИКИ МЕТАНА В МИРЕ И В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ. СООТНОШЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ (ПРИРОДНЫХ) И АНТРОПОГЕННЫХ ВЫБРОСОВ МЕТАНА В АТМОСФЕРУ	20
1.1.1 ЦИКЛ МЕТАНА	20
1.1.1.1 Общие данные о цикле метана	20
1.1.1.2 Связь интенсивности источников и стоков метана с климатическим режимом	26
1.1.2 ДАННЫЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ ЕСТЕСТВЕННЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ЭМИССИЙ МЕТАНА В АТМОСФЕРУ	29
1.1.2.1 Данные проекта «Глобальный бюджет метана»	29
1.1.2.2 Данные Шестого оценочного доклада Межправительственной группы экспертов по изменениям климата (ОД6 МГЭИК)	35
1.1.2.3 Данные для эмиссий метана из влажных экосистем проекта WETCHIMP	37
1.1.3 ИНВЕНТАРИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ЭМИССИИ МЕТАНА В АТМОСФЕРУ: ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ	40
1.1.4 ВЫВОДЫ	45
1.2 ГАЗОПРОЯВЛЕНИЯ НА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ	46
1.2.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРИРОДНЫХ ГАЗОПРОЯВЛЕНИЯХ	46
1.2.2 МЕТАН В АРКТИКЕ	48
1.2.3 ВКЛАД ПРИРОДНЫХ ГАЗОПРОЯВЛЕНИЙ В ОБЩИЙ БЮДЖЕТ МЕТАНА	52
1.2.3.1 Морские экспедиционные наблюдения	52
1.2.3.2 Наземные измерения	61
1.2.3.3 Спутниковые данные	63
1.2.3.4 Сравнение различных оценок газопроявлений в Арктике BU-методом	70
1.2.3.5 TD-подход	74
1.2.4. ВЫВОДЫ	76
1.3 РОЛЬ МЕТАНА В АТМОСФЕРНЫХ ФОТОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ, БАЛАНС МЕТАНА В ПОЧВАХ, АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ТРАНСФОРМАЦИИ МЕТАНА В АТМОСФЕРЕ И ПРОЦЕССОВ ЕСТЕСТВЕННОГО ИЗЪЯТИЯ МЕТАНА ИЗ АТМОСФЕРЫ И В ПОЧВАХ ..	77
1.3.1 ОБЗОР ОСНОВНЫХ ХИМИЧЕСКИХ И БИОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАНА	78
1.3.1.1 Химические процессы разрушения метана в атмосфере	78
1.3.1.2 Поглощение метана в почве	81
1.3.2 ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАНА В АТМОСФЕРЕ И ПОГЛОЩЕНИЯ ПОЧВОЙ	83
1.3.2.1 Используемые данные	83
1.3.2.2 Данные проекта АССМIP	84

1.3.3 ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАНА В АТМОСФЕРЕ И ПОГЛОЩЕНИЯ ПОЧВОЙ ..	89
1.3.3.1 Процессы разрушения метана в атмосфере и поглощения почвой	89
1.3.3.2 Связь времени жизни метана в атмосфере с климатическим режимом и эмиссиями примесей в атмосферу	94
1.3.4 СОВРЕМЕННЫЕ ДАННЫЕ О БЮДЖЕТЕ МЕТАНА В СТРАТОСФЕРЕ.....	98
1.3.4.1 Оценки интенсивности стока метана из атмосферы	98
1.3.4.2 Оценка качества данных об источниках и стоках	104
1.3.4.3 Разность между источниками и стоками для Российской Федерации.....	105
1.3.4.4 Полный бюджет метана в атмосфере	107
1.3.5 ВЫВОДЫ.....	108
1.4 ОЦЕНКИ СОВРЕМЕННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА В АТМОСФЕРЕ И ЕЕ ИЗМЕНЕНИЙ И ПРИЧИНЫ ЕЕ УВЕЛИЧЕНИЯ. ВОЗМОЖНАЯ ДИНАМИКА КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА ДЛЯ СЦЕНАРИЯ С УВЕЛИЧЕНИЕМ ВЫБРОСОВ ВОДОРОДА	109
1.4.1 СОДЕРЖАНИЕ МЕТАНА В АТМОСФЕРЕ И ПРИЧИНЫ ЕГО РОСТА. ОЦЕНКА ЭФФЕКТА ОТ УВЕЛИЧЕНИЯ ВЫБРОСОВ ВОДОРОДА НА СОДЕРЖАНИЕ МЕТАНА В ТРОПОСФЕРЕ	110
1.4.1.1 Данные и методы.....	110
1.4.1.2 Количественные оценки современной концентрации метана в атмосфере и многолетних трендов по данным наблюдений	125
1.4.1.3 Оценки возможной динамики концентрации метана в тропосфере для сценария с увеличением выбросов водорода	133
1.4.2. ВЛИЯНИЕ АНТРОПОГЕННЫХ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ ВОДОРОДА НА ТРОПОСФЕРНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГИДРОКСИЛА И МЕТАНА.....	138
1.4.3 ВЫВОДЫ.....	143
2 ВЫБРОСЫ МЕТАНА В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ	145
2.1 ИЗМЕНЕНИЯ ЗОН СТАБИЛЬНОСТИ ГИДРАТОВ МЕТАНА, ОЦЕНКА ДЕСТАБИЛИЗАЦИИ РЕЛИКТОВЫХ МЕТАНОГИДРАТОВ ПРИ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ КЛИМАТА	145
2.1.1 ВВЕДЕНИЕ.....	145
2.1.2 ОЦЕНКА ТЕРМОБАРИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ МЕТАНГИДРАТОВ В УСЛОВИЯХ ПОКРОВНОГО ОЛЕДЕНЕНИЯ	148
2.1.3 ОЦЕНКА ГИДРАТОНАСЫЩЕННОСТИ В УСЛОВИЯХ ПОКРОВНОГО ОЛЕДЕНЕНИЯ.....	152
2.1.4 АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ И ЗОН СТАБИЛЬНОСТИ МЕТАНГИДРАТОВ В СЕВЕРНЫХ РЕГИОНАХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 100 ТЫС. ЛЕТ	158
2.1.5 АНАЛИЗ УСЛОВИЙ СТАБИЛЬНОСТИ РЕЛИКТОВЫХ МЕТАНГИДРАТОВ В ГОЛОЦЕНЕ.....	167
2.1.6 ВЫВОДЫ.....	174

2.2 ЭМИССИЯ МЕТАНА ИЗ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ БОЛОТ РОССИИ В УСЛОВИЯХ ПРОГНОЗИРУЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА.....	176
2.2.1 ВВЕДЕНИЕ.....	177
2.2.2 ОЦЕНКИ ЭМИССИИ МЕТАНА ИЗ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ БОЛОТ.....	180
2.2.2.1 Модельные оценки современных эмиссий метана из внетропических влажных экосистем Северного полушария.....	181
2.2.2.2 Оценки эмиссии метана из многолетнемерзлых болот России в XXI веке по расчетам с КМ ИФА РАН	184
2.2.3 ВЫВОДЫ.....	189
2.3 ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ АНОМАЛИИ ЭМИССИЙ МЕТАНА, ОБНАРУЖЕННЫЕ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ НА ПОСТПОЖАРНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ В ЗОНЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ И ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА	190
2.3.1 ВВЕДЕНИЕ.....	191
2.3.2 ДИНАМИКА ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ В ЗОНЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ И ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ.....	192
2.3.3 ОСОБЕННОСТИ АНАЛИЗА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СЕРИЙ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ МЕТАНА В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ	196
2.3.4 ВЫЯВЛЕНИЕ АНОМАЛИЙ КОНЦЕНТРАЦИЙ СОДЕРЖАНИЯ МЕТАНА В ЗОНЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ И ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ.....	198
2.3.5 ВЫВОДЫ.....	205

3 СИСТЕМЫ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫБРОСОВ МЕТАНА В АТМОСФЕРУ В НАЦИОНАЛЬНЫХ КАДАСТРАХ.....206

3.1 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭМИССИИ МЕТАНА В АТМОСФЕРУ В НАЦИОНАЛЬНЫХ КАДАСТРАХ.....	206
3.1.1 ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ	206
3.1.2 КОЭФФИЦИЕНТЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В АТМОСФЕРУ ОТ ОПЕРАЦИЙ С НЕФТЬЮ И ПРИРОДНЫМ ГАЗОМ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СТРАН	211
3.1.3 ПРИМЕРЫ РАЗРАБОТКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В АТМОСФЕРУ	224
3.1.3.1 Газовая промышленность США.....	224
3.1.3.2 Нефтегазовая промышленность Канады	224
3.1.4 ВЫВОДЫ.....	226

3.2 РАЗВИТИЕ НАЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЭМИССИИ МЕТАНА В АТМОСФЕРУ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НЕФТЯНОЙ И ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	227
3.2.1 МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ	227
3.2.2 АНАЛИЗ НЕОБХОДИМЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ	228
3.2.3 ДОСТУПНОСТЬ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ	230
3.2.4 АНАЛИЗ ДОСТУПНЫХ ДАННЫХ	233
3.2.5 МЕТОДОЛОГИЯ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ	233
3.2.6 СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ВЕЛИЧИН ВЫБРОСОВ	240
3.2.7 ПРИБЛИЖЕННАЯ ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНО ВОЗМОЖНОГО ВЫБРОСА МЕТАНА В АТМОСФЕРУ НА СТАДИИ ТРАНСПОРТИРОВКИ, РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ПОТРЕБЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ БАЛАНСА ЭНЕРГОРЕСУРСОВ	247
3.2.8 ВЫВОДЫ	249

4 НОВЫЕ МЕТРИКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В АТМОСФЕРУ 251

4.1 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛА ИЗМЕНЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ (GTP) И ПОТЕНЦИАЛА ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ (GWP). РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПОТЕНЦИАЛА ИЗМЕНЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ (GTP)	251
4.1.1 ВВЕДЕНИЕ	252
4.1.2 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ GTP, GWP И НОВЫХ ЭМИССИОННЫХ МЕТРИК ПО ДАННЫМ ОЦЕНОЧНЫХ ДОКЛАДОВ МГЭИК	253
4.1.2.1 Концепции GWP и GTP	253
4.1.2.2 Неопределенности и ограничения GWP и GTP	256
4.1.2.3 Анализ GTP, GWP и новых эмиссионных потенциалов	258
4.1.2.4 Физическое обоснование выбора эмиссионных метрик	260
4.1.3 АНАЛИЗ GTP, GWP И КУМУЛЯТИВНЫХ МЕТРИК НА ИХ ОСНОВЕ ПО РАСЧЕТАМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ЗЕМНОЙ СИСТЕМЫ ИФА РАН	261
4.1.3.1 Методы и данные	262
4.1.3.2 Эффект учета изменяющихся фоновых условий при расчете GTP	265
4.1.3.3 Оценки кумулятивного температурного потенциала антропогенных эмиссий CO ₂ и CH ₄ и их относительного вклада в изменение GSAT	269
4.1.4 ВЫВОДЫ	271
4.2. ВЛИЯНИЕ МЕТРИК ПЕРЕВОДА ВЫБРОСОВ ОТДЕЛЬНЫХ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В ЭКВИВАЛЕНТ CO ₂ НА СОВОКУПНЫЕ ВЫБРОСЫ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В РОССИИ И ВКЛАД В НИХ ВЫБРОСОВ ОТ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ	272

4.2.1. ВЫБОР МЕТРИК ПЕРЕВОДА ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В ЭКВИВАЛЕНТ CO ₂	273
4.2.2 ПОТЕНЦИАЛ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ НА ВРЕМЕННОМ ГОРИЗОНТЕ 100 ЛЕТ	281
4.2.3 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДРУГИХ МЕТРИК	283
4.2.4 ВЫВОДЫ	284
5 РОЛЬ МЕТАНА В ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА	286
5.1 ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА	286
5.1.1. АТРИБУЦИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА	286
5.1.2. МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ К ВЫЯВЛЕНИЮ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА	287
5.1.2.1. Методы атрибуции, использующие данные наблюдений	287
5.1.2.2. Методы атрибуции, основанные на расчетах с моделями Земной системы	293
5.1.2.3 Количественный анализ факторов, влияющих на глобальные изменения климата, с использованием модели Земной системы ИФА РАН	297
5.1.3. ВЫВОДЫ	303
5.2 ОЦЕНКА КЛИМАТИЧЕСКОЙ РОЛИ АНТРОПОГЕННЫХ ВЫБРОСОВ МЕТАНА В СРАВНЕНИИ С ДРУГИМИ ПАРНИКОВЫМИ ГАЗАМИ	304
5.2.1 ВВЕДЕНИЕ	305
5.2.2 КЛИМАТИЧЕСКАЯ РОЛЬ МЕТАНА ПО ДАННЫМ ШЕСТОГО ОЦЕНОЧНОГО ДОКЛАДА МГЭИК	307
5.2.2.1 Современный радиационный бюджет	307
5.2.2.2 Радиационный форсинг метана по сравнению с другими парниковыми газами	310
5.2.2.3 Вклад парниковых газов в изменения температуры	312
5.2.2.4 Оценки вклада эмиссии парниковых газов в изменения климата	315
5.2.3 КЛИМАТИЧЕСКАЯ РОЛЬ АНТРОПОГЕННЫХ И ПРИРОДНЫХ ЭМИССИЙ МЕТАНА И УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА ПО РАСЧЕТАМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ЗЕМНОЙ СИСТЕМЫ ИФА РАН	318
5.2.3.1 Эксперименты с моделью Земной системы ИФА РАН	319
5.2.3.2 Кумулятивный температурный потенциал	320
5.2.3.3 Результаты оценок с использованием модели Земной системы ИФА РАН	321
5.2.4 ВЫВОДЫ	328
5.3 ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ К ИСКЛЮЧЕНИЮ ИЗ НИХ ВЫБРОСОВ МЕТАНА В АТМОСФЕРУ ОТ ГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ	328
5.3.1 РАДИАЦИОННЫЙ БАЛАНС АТМОСФЕРЫ	329
5.3.2 РАДИАЦИОННЫЙ ФОРСИНГ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ К МАЛЫМ ВОЗМУЩЕНИЯМ	329

5.3.3 ОЦЕНКИ ЭМИССИИ МЕТАНА В АТМОСФЕРЕ ОТ ГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ РОССИИ И ЕЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ РОЛИ В ГЛОБАЛЬНОЙ ЭМИССИИ МЕТАНА	332
5.3.4 ОПИСАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИВМ РАН И ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С НЕЙ.....	334
5.3.5 РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ РАДИАЦИОННОГО ФОРСИНГА И ИХ СРАВНЕНИЕ С ДРУГИМИ ОЦЕНКАМИ	335
5.3.6 ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ У ПОВЕРХНОСТИ ПОСЛЕ ПРЕКРАЩЕНИЯ ВЫБРОСОВ ПАО «ГАЗПРОМ»	339
5.3.7 ВЫВОДЫ.....	340
ЛИТЕРАТУРА.....	341