



# **РОЛЬ МЕТАНА В ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА**

Издание подготовлено Автономной некоммерческой организацией «Научно-исследовательский институт проблем экологии» и Общероссийской общественной организацией «Общественная Российская экологическая академия» совместно с Неправительственным экологическим фондом имени В.И. Вернадского.

**Роль метана в изменении климата**, под ред. д.х.н., профессора **А.Г. Ишкова**

ISBN

В данной работе представлены анализ роли метана в изменении климата на основе различных показателей, используемых в научных исследованиях и рекомендации по объективной оценке роли метана в глобальных процессах изменения климата.

В публикации даны анализ соотношения антропогенных и природных выбросов метана, оценка вклада различных источников выбросов в общую эмиссию метана в атмосферу и в рост концентрации метана в последние годы.

Издание предназначено для широкого круга экспертов и лиц, принимающих решения.

Координатор проектов Международного делового конгресса: руководитель технической кооперации «Юнипер С.Е.» **Д. Весслинг**.

Координатор проекта: Комитет Международного делового конгресса «Промышленность, инновации и перспективное развитие».

Научные руководители темы Международного делового конгресса:

Координатор подгруппы «Экология» Комитета Международного делового конгресса «Экология и здравоохранение», д.х.н., профессор **А.Г. Ишков**, заместитель председателя Комитета Международного делового конгресса «Промышленность, инновации и перспективное развитие», д.т.н., профессор, член-корр. РАН **В.А. Грачев**.

Операторы: Общероссийская общественная организация «Общественная Российская экологическая академия», президент **В.А. Грачев**, Автономная некоммерческая организация «Научно-исследовательский институт проблем экологии» (НИИПЭ), директор **О.В. Плямина**.

Эксперты: к.э.н. **К.В. Романов** (ПАО «Газпром»), д.т.н., профессор, член-корр. РАН **В.А. Грачев**, (Центр глобальной экологии МГУ им. М.В. Ломоносова) д.ф.-м.н. **С.М. Семенов**, **И.Л. Говор**, **Н.Е. Уварова** (ФГБУ «Институт глобального климата и экологии»), д.ф.-м.н., профессор **И.Л. Кароль**, **В.М. Ивахов**, **А.А. Киселев** (ФГБУ «ГГО им. А.И. Воейкова»), к.э.н. **С.А. Рогинко** (Центр экологии и развития Института Европы РАН), к.э.н., **Н.Б. Пыстина**, **Н.А. Боярчук** (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»), к.г.н. **В.А. Лобковский** (Институт географии РАН), к.п.н. **М. Кун** («Газпром Германия»), главный редактор документов по стратегии Европейского Центра энергетической и ресурсной безопасности (EUCERS), Европейский Центр энергетической и ресурсной безопасности (EUCERS), Королевский колледж Лондона).

ISBN

© НИИПЭ, 2018  
© Неправительственный экологический фонд имени В.И. Вернадского, 2018  
© Российская экологическая академия, 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ПАРНИКОВЫЕ ГАЗЫ, МЕХАНИЗМ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КЛИМАТ И ЭФФЕКТ ИХ СОВМЕСТНОГО ДЕЙСТВИЯ.....	8
2. МЕЖДУНАРОДНЫЕ НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ, РЕГУЛИРУЮЩИЕ ВЫБРОСЫ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ.....	11
3. РЕТРОСПЕКТИВА КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА В АТМОСФЕРЕ.....	16
4. ГЛОБАЛЬНЫЙ БЮДЖЕТ МЕТАНА В АТМОСФЕРЕ.....	20
4.1. Основные источники метана.....	21
4.1.1. Естественные источники.....	23
4.1.2. Антропогенные источники.....	25
4.2. Сток метана.....	28
4.3. Сводные данные о современном бюджете метана.....	28
5. ОЦЕНКА «ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ» МЕТАНА В АТМОСФЕРЕ И ФАКТОРЫ, ЕГО ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ.....	30
6. МЕХАНИЗМЫ ВЛИЯНИЯ МЕТАНА НА ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА.....	34
6.1. Основы.....	34
6.2. Оценка современной концентрации метана в атмосфере и ее изменения в индустриальную эру.....	41
6.3. Существующие подходы к моделированию и прогнозу эмиссии и концентрации метана.....	46
6.4. Сценарии эмиссии и концентрации метана.....	51
7. ПОКАЗАТЕЛИ, ОЦЕНИВАЮЩИЕ ВЛИЯНИЕ МЕТАНА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ПАРНИКОВОГО ЭФФЕКТА.....	58
7.1. Потенциал глобального потепления.....	58
7.2. Потенциал изменения глобальной температуры.....	60

7.3. Метеорологическая оценка, радиационный форсинг и его исследования.....	62
7.4. Влияние облачности и аэрозолей на климатические изменения.....	67
8. КЛИМАТИЧЕСКАЯ РОЛЬ АНТРОПОГЕННЫХ ВЫБРОСОВ МЕТАНА ПО СРАВНЕНИЮ С ДРУГИМИ ПАРНИКОВЫМИ ГАЗАМИ.....	72
9. АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ВЗГЛЯД НА ПРОБЛЕМУ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА.....	76
10. ВОЗМОЖНОСТИ СОКРАЩЕНИЯ ВЫБРОСОВ МЕТАНА В АТМОСФЕРУ ОТ АНТРОПОГЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	90
11. ГАЗОВАЯ ОТРАСЛЬ КАК ИСТОЧНИК ЭМИССИИ МЕТАНА В АТМОСФЕРУ.....	97
12. УГЛЕРОДНЫЙ СЛЕД ПРИРОДНОГО ГАЗА И ЕГО РОЛЬ В ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИКИ.....	103
13. РОЛЬ МЕТАНА В ГЛОБАЛЬНОМ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА.....	106
13.1. Оценка роли метана в теории потепления климата.....	106
13.2. Комплексный анализ роли метана в изменении климата.....	108
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.....	117
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	120

## ВВЕДЕНИЕ

Глобальное изменение климата за последние десятилетия в общественном сознании многих стран заняло прочное место в ряду глобальных экологических проблем. Признание актуальности проблемы глобального изменения климата и необходимости коллективных действий по предотвращению или хотя бы смягчению последствий этих изменений было подтверждено принятием в 1992 году Рамочной конвенции Организации объединенных наций об изменении климата (РКИК ООН).

Общий парниковый эффект планеты обеспечивается, в первую очередь, парами воды, без которых жизнь на Земле была бы не возможна. Важнейшим шагом на пути реализации действий, предусмотренных Конвенцией, стало принятие и вступление в силу Киотского протокола. Существенную роль в обеспечении успешного достижения целей Конвенции и Киотского протокола играет Россия. Достаточно напомнить, что если бы Россия не ратифицировала Киотский протокол, то он так и не вступил бы в силу.

Климат на Земле подвержен колебаниям во всех временных масштабах. К числу наиболее заметных колебаний относится цикл порядка ста тысяч лет – ледниковые периоды, когда климат Земли был в основном холоднее по сравнению с настоящим, и межледниковые периоды, когда климат был теплее. Эти циклы вызывались естественными причинами. По мнению ряда ученых, и сейчас мы находимся в «движении» от одного ледникового периода к другому, но скорость изменений очень мала – порядка 0,02°C за 100 лет.

В числе парниковых газов второе место после CO<sub>2</sub>, по мнению многих, занимает метан. Метан является продуктом природных процессов, происходящих в биосфере, и выделяется в процессе промышленной деятельности человека. Необходима оценка и роли метана в глобальном изменении климата и особенно метана антропогенного происхождения.

Изучение климатических изменений последних тысячелетий показывает, что палеоклиматические данные, основанные на кернах льда, кольцах деревьев, озерных донных отложениях, коралловых рифах, позволяют реконструировать климат прошлого. Много миллионов лет назад, во времена динозавров, климат был намного теплее – в среднем на 7°C по планете в целом. Затем климат постепенно становился холоднее, причем в истории Земли было немало резких изменений (в основном похолоданий), когда наблюдалось массовое вымирание живых организмов.

*Естественными причинами изменения климата*, как показывает системный анализ проблемы, являются:

1. Смещение орбиты и угла наклона Земли.
2. Изменение солнечной активности.
3. Вулканические извержения и изменение качества атмосферных аэрозолей.

Анализ показывает, что естественные причины влияют на климат на порядок выше, чем антропогенные. По экономическим и политическим причинам естественные причины климатических изменений и факторы, компенсирующие естественным путем антропогенное влияние на климат, практически не рассматриваются. Финансирование на такие работы не выделяется.

Практически отсутствуют серьезные работы о роли паров воды в изменении климата в меняющихся условиях (загрязнение океана, промышленные выбросы, таяние льдов и др.). В данной работе приведен объективный обзор существующих точек зрения на роль метана в глобальном изменении климата.

По оценкам МГЭИК, время жизни метана в атмосфере составляет 9-12 лет. Он безвозвратно расходуется, главным образом, в реакциях с гидроксидом (в основном в тропосфере) и атомарным хлором (в основном в стратосфере).

В этой связи борьба с современными выбросами метана с учетом возможных катастрофических последствий изменения климата к концу столетия теряет смысл. Тем не менее, многие дискуссии ведутся именно вокруг снижения эмиссии метана, поскольку популяризируется идея о том, что антропогенные выбросы метана от нефтегазовой отрасли легче регулировать и сократить, поэтому «лечение» проблемы предлагается не там, где необходимы действия (где «болит»), а там, где можно «продавить». В работах многих ученых обосновываются аргументированные и альтернативные точки зрения по проблеме глобального потепления. Согласно таким работам малый ледниковый период начнется с 2020-2030 гг. Есть опасения, что методы оценки глобального изменения температуры методически не верны, и глобального потепления не только нет, но, и более того, в последние 20 лет наблюдается похолодание, а также что влияние естественных факторов (изменение орбиты Земли, солнечного излучения, внутривулканических процессов не менее значительно, чем антропогенные воздействия).

Мнение ученых, отстаивавших альтернативную точку зрения, в публикациях для общественности игнорируется. Не учитывается влияние биоты на глобальные процессы в климате, о чем говорил В.И. Вернадский еще почти 100 лет назад. Биомасса при повышенном содержании  $\text{CO}_2$  и ускорении оборота воды отвечает усиленным ростом и положительным влиянием на всю биологическую систему Земли.

Обостренное восприятие обществом проблемы глобального изменения климата влияет на конкурентную борьбу производителей энергоресурсов. Влияние парниковых газов на климат хоть и не является окончательно доказанным фактом, оказывается предметом постоянного обсуждения и принятия политических решений, а в последние годы особенно активно обсуждается так называемый «углеродный след» (Carbon footprint).

Углеродный след включает прямые и косвенные выбросы парниковых газов (обычно в г.  $\text{CO}_2$ -экв./единицу продукции). Такой подход позволяет более объективно оценить эмиссии парниковых газов для различной продукции на всём жизненном цикле или в процессе получения продукта. Это позволяет как объективно сравнивать разные источники получения энергии, в том числе возобновляемые и невозобновляемые, так и объективно определять «горячие точки», на которых необходимо сосредоточить меры по сокращению выбросов парниковых газов.

У экспертов, принимавших участие в подготовке данного аналитического обзора, не во всём совпадают взгляды на проблему возможных изменений климата за счет антропогенных выбросов парниковых газов, в том числе метана. Тем не менее, основные выводы обзора являются, на наш взгляд, наиболее объективными на данный период.

Разделы 1-6, 7.1, 7.2, 8, 10, 13.1 подготовлены С.М. Семёновым, И.Л. Говор, Н.Е. Уваровой, раздел 7.3 – И.Л. Кароль, В.М. Иваховым, А.А. Киселевым, раздел 9 – С.А. Рогинко, раздел 11 – Н.Б. Пыстиной, Н.А. Боярчук, разделы 7.4, 12, 13.2 – В.А. Грачевым, К.В. Романовым, М. Куном. Введение и выводы подготовлены В.А. Грачевым под руководством редактора издания А.Г. Ишкова.

В последние десятилетия (1981–2010 гг.) среднегодовая глобальная приповерхностная температура составляла около 14°C или 287 К [1]. Палеоклиматические данные и данные мониторинга глобального климата, основанные на результатах систематических инструментальных измерений гидрометеорологических параметров, указывают на то, что эта величина не является неизменной. Она менялась как в исторических временах, так и в новейшее время. В период 1880–2012 гг. она выросла на 0,85 градуса [2]. В чем же причина этих изменений?

Существуют естественные факторы, которые всегда оказывали влияние на поток солнечной энергии, поглощаемый земной поверхностью. Это – астрономические орбитальные факторы: форма орбиты меняется, она вращается в своей плоскости; положение земной оси относительно плоскости земной орбиты меняется. Такие изменения являются циклическими, ненаправленными. Согласно теории Миланковича [3], такие изменения приводят к циклическим же изменениям потока солнечного излучения, поглощаемого земной поверхностью, что и является причиной циклических изменений земного климата (в том числе оледенений). Несмотря на некоторые серьезные возражения [4], эта теория в настоящее время является доминирующей. При этом типичный временной масштаб таких явлений – десятки и сотни тысяч лет.

Существуют и весьма короткопериодные колебания потока солнечного излучения, поглощаемого земной поверхностью. Они вызваны тем, что светимость Солнца циклически меняется. Например, существует 11-летний цикл (цикл Швабе). Этот процесс сказывается на приповерхностной температуре на Земле.

Однако существуют и иные причины изменения земного климата, не связанные с изменением потока солнечной энергии, приходящего к земной поверхности, а связанные с изменениями свойств атмосферы и земной поверхности.

Это можно иллюстрировать следующим образом: если бы у Земли не было атмосферы (и тем самым, в частности, на Земле не было бы воды), то земной поверхности достигал бы поток солнечного излучения в среднем 341,3 Вт м<sup>-2</sup> [5]. В состоянии термодинамического равновесия земная поверхность излучала бы столько же. Таким образом, согласно закону Стефана-Больцмана, температура земной поверхности была бы  $287 \times (341,3/396)^{0,25} = 277$  К. При этом реальное современное излучение земной поверхности составляет 396 Вт м<sup>-2</sup>, что обеспечивает температуру на 10 градусов больше.

Атмосфера оказывает влияние на формирование термического режима тремя путями:

- часть потока солнечного излучения рассеивается и перенаправляется обратно в космос;
- часть потока солнечного излучения поглощается атмосферой;
- большая часть потока инфракрасного излучения земной поверхности и атмосферных слоев захватывается атмосферой и перенаправляется к земной поверхности (парниковый эффект).

С начала индустриальной эры (условно с 1750 г.) вследствие хозяйственной деятельности человека содержание парниковых газов в атмосфере существенно возросло (кроме водяного пара, рост содержания которого компенсируется длительностью цикла его оборота с поверхности Земли)<sup>1</sup>. Это уже сказалось на термическом режиме приповерхностного слоя. На рис. 1.1 представлена информация, отражающая вклады различных факторов в изменение глобальной температуры в 1951–2010 гг. [2]. Можно видеть, что вклад парниковых газов (зеленый цвет) значителен и близок к 0,9 градуса. Фактическое изменение (черный цвет) несколько меньше, поскольку есть и охлаждающие факторы.

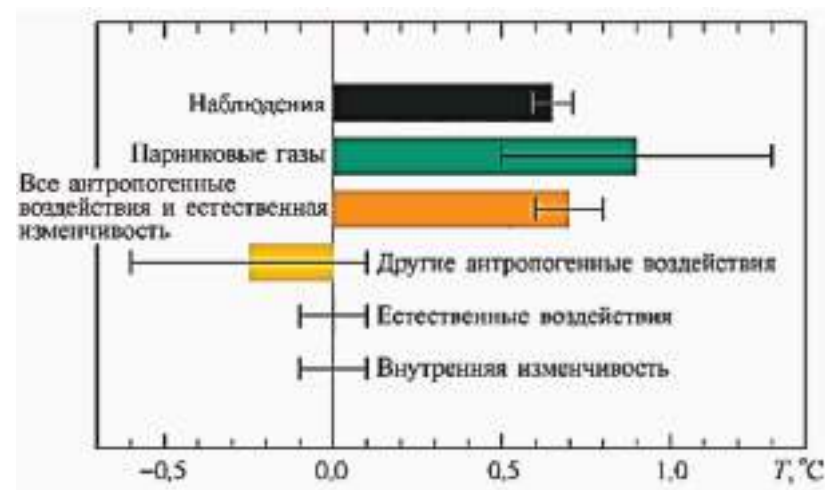


Рисунок 1.1. Вероятностные границы (горизонтальные интервалы) и средние значения (цветные прямоугольники) оценок установленного вклада различных факторов в линейный тренд наблюдавшегося глобального потепления в 1951–2010 гг. (IPCC, 2014a)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Прим. ред.

<sup>2</sup> «Наблюдения потепления», оцениваемые величиной 0,85 °C сопоставимы с наблюдаемым снижением (- 0,3 °C). Прим. ред.

В суммарном действии парниковых газов вклад метана не является доминирующим. Основным фактором, конечно, является рост концентрации углекислого газа.

Существующие международные соглашения, направленные на ограничение роста концентраций парниковых газов в атмосфере для сдерживания глобального потепления, – Рамочная конвенция ООН об изменении климата (далее – РКИК ООН), Киотский протокол, Парижское соглашение – реализуют, прежде всего, меры по ограничению обогащения атмосферы углекислым газом.

Однако и проблема метана уже в значительной степени осознается мировым сообществом. Так, в 2012 году было объявлено о новой глобальной инициативе по борьбе с изменением климата, улучшением качества воздуха и защитой здоровья населения – о формировании «Коалиции за климат и чистый воздух» (Climate and Clean Air Coalition). Деятельность этой организации направлена на снижение содержания в атмосфере так называемых «короткоживущих факторов изменения климата»<sup>3</sup>. Так называют вещества с небольшим временем жизни в атмосфере – порядка 10 лет и менее. Помимо метана, к ним относятся черный углерод и многие гидрофторуглероды, которые в целом, ответственны примерно за треть современного глобального потепления. По сравнению с CO<sub>2</sub> небольшое время жизни таких веществ в климатической системе Земли способствует эффективности мер по ограничению содержания их в атмосфере – снижение глобального выброса в обозримом будущем (десятилетия и меньше) приведет к нужному эффекту.

<sup>3</sup> Смещение фокуса в общественных дискуссиях от долгосрочных к короткоживущим факторам, то есть направленность, например, на метан вместо CO<sub>2</sub>, по факту позволяет демонстрировать виртуальное сокращение выбросов, не изменяя общего влияния основного фактора на климатическую систему (Ред.)

## 2

## МЕЖДУНАРОДНЫЕ НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ, РЕГУЛИРУЮЩИЕ ВЫБРОСЫ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

В настоящий момент изменение климата является одной из ведущих мировых проблем, решение которой возможно только при высоком уровне сотрудничества между странами. Основные парниковые газы являются «хорошо перемешанными» (well-mixed) в атмосфере. Это, в частности, означает, что ограничение их содержания в атмосфере – не локальная проблема. Какая-либо страна, даже обладающая большой территорией, не может решить эту проблему самостоятельно путем ограничения выбросов парниковых газов на национальном уровне. Несмотря на все такие ограничения, она будет получать парниковые газы из глобального пула, т.е. за счет выбросов других стран. Таким образом, единственным путем решения проблемы является международное сотрудничество.

Этот процесс может осуществляться на самых разных уровнях как на уровне объединений стран (в том числе в рамках ООН, ОЭСР<sup>4</sup>, БРИКС, Арктического совета и др.), так и на уровне партнерств между отдельными участниками, включая правительственные и неправительственные организации, международные промышленные корпорации. Само регулирование выбросов парниковых газов может проводиться различными способами как в виде ужесточения политики по отношению к антропогенным выбросам, так и путем создания благоприятных условий и механизмов для внедрения низкоуглеродных технологий. При этом принятые этими объединениями климатические инициативы могут иметь как обязательный, так и добровольный характер для их участников. Россия как государство принимает решение о присоединении к таким международным инициативам, исходя из своих национальных приоритетов во внутренней и внешней политике. Далее кратко рассмотрены основные международные соглашения и инициативы, направленные на регулирование как выбросов парниковых газов в целом, так и метана в частности, в которых Россия принимает или собирается принять участие.

Основным международным документом, регулирующим глобальное антропогенное воздействие на климат, является Рамочная конвенция ООН об изменении климата (UN Framework Convention on Climate Change, РКИК ООН), принятая 9 мая 1992 года и вступившая в силу 21 марта 1994 года. Это соглашение об общих принципах совместных действий для сдерживания процессов изменения климата на планете, и его цель сформулирована в статье [6]:

*«Конечная цель настоящей Конвенции и всех связанных с ней правовых документов, которые может принять Конференция Сторон, заключается*

<sup>4</sup> Организация Объединенных Наций (ООН), Организация экономического сотрудничества и развития (ОЭСР)



*в том, чтобы добиться во исполнение соответствующих положений Конвенции стабилизации концентраций парниковых газов в атмосфере на таком уровне, который не допускал бы опасного антропогенного воздействия на климатическую систему. Такой уровень должен быть достигнут в сроки, достаточные для естественной адаптации экосистем к изменению климата, позволяющие не ставить под угрозу производство продовольствия и обеспечивающие дальнейшее экономическое развитие на устойчивой основе».*

Общая задача РКИК ООН при этом заключается в сдерживании роста объема антропогенных выбросов парниковых газов, согласованном снижении в рамках международно зафиксированных обязательств доли отдельных стран и организации специальных мероприятий, увеличивающих интенсивность поглощения отдельных газов наземными экосистемами.

Россия является участником РКИК ООН с 28 марта 1995 года [7]. В настоящее время она ратифицирована 197<sup>5</sup> государствами, которые, согласно Конвенции, дифференцированы на три основные группы:

- страны Приложения I: члены ОЭСР (промышленно развитые страны), а также страны с переходной экономикой (в том числе Россия), принявшие на себя особые обязательства по ограничению выбросов;
- страны Приложения II (исключительно члены ОЭСР), принявшие на себя особые обязательства финансового характера по помощи развивающимся странам и странам с переходной экономикой;
- развивающиеся страны.

Высшим органом РКИК ООН, определяющим механизмы ее действия и отслеживающим ход выполнения поставленных задач, является ежегодная Конференция сторон.

В декабре 1997 года на 3-й Конференции сторон в Киото был принят Киотский протокол к РКИК ООН [8], обязывающий развитые страны и страны с переходной экономикой – стороны Протокола (в том числе Россию) – ограничивать выбросы парниковых газов и предусматривающий различные финансовые механизмы для этого. В числе поставленных в нем целей – сокращение суммарного выброса парниковых газов (метана в их числе), по крайней мере, на 5% в период с 2008 по 2012 гг. (от уровней 1990 года). Документ вступил в силу 16 февраля 2005 года.

Участниками Киотского протокола являются 192<sup>6</sup> государства. После окончания первого периода выполнения обязательств было принято решение о реализации второго периода с 1 января 2013 года до 31 декабря 2020 года. Принятая в конце 2012 года в Дохе поправка к Киотскому протоколу [9] включает новые обязательства, которые были взяты его сторонами в дополнение к уже

<sup>5</sup> Данные на февраль 2018 г. с официального сайта РКИК ООН unfccc.int

<sup>6</sup> Данные на февраль 2018 г. с официального сайта РКИК ООН unfccc.int

существующим на второй период их действия. Ратифицировали этот документ только 83 страны.

Наша страна ратифицировала Киотский протокол в конце 2004 года [10], что и обеспечило вступление в силу этого международного соглашения. Согласно ему, Россия должна была сохранить среднегодовые выбросы в 2008-2012 годах на уровне 1990 года. В рамках второго периода Киотского протокола Россия, как и многие другие страны, отказалась принимать на себя какие-либо обязательства.

Решением 21-й Конференции сторон РКИК ООН от 12 декабря 2015 года был принят новый климатический договор – Парижское соглашение [11]. Этот документ уже ратифицирован 174<sup>7</sup> странами и вступил в действие 4 ноября 2016 года.

Главная цель Парижского соглашения заключается в укреплении глобальных мер по борьбе с изменением климата, чтобы удержать повышение глобальной температуры в этом веке в пределах +2 °С по отношению к доиндустриальному уровню и попытаться даже снизить этот показатель до +1,5 °С.

Для этого страны-участницы определяют свои вклады в достижение декларируемой общей цели в индивидуальном порядке и пересматривают их раз в пять лет. В отличие от Киотского протокола, **Парижское соглашение не предусматривает обязательств по снижению выбросов парниковых газов, и принимаемые в его рамках каждой страной Национальные стратегии по сокращению парниковых газов имеют добровольную основу.** Россия подписала Парижское соглашение 22 апреля 2016 года [12 – 13], но пока не ратифицировала его. В настоящее время в России утверждён план подготовки к ратификации Парижского соглашения, согласно которому решение о его целесообразности планируется принять в 2019 году [14].

Регулирование выбросов парниковых газов, в частности, их основного компонента – углекислого газа, сталкивается с той проблемой, что время его жизни в атмосфере Земли достаточно велико – около 100 лет. Как следствие, меры, направленные на сокращение антропогенной эмиссии CO<sub>2</sub>, даже при высокой их успешности скажутся лишь через несколько десятилетий или позднее. В этой ситуации в настоящее время активно предлагается идея сокращения выбросов короткоживущих климатических загрязнителей (или «короткоживущих факторов воздействия на климат»), в том числе метана, чье воздействие на радиационный режим и на климат тоже значительно, но время пребывания в атмосфере существенно меньше.

Так, на 38-й встрече лидеров стран «Большой восьмерки» (Group of Eight, далее – G8) в 2012 году была выдвинута принципиально новая международная инициатива, поддержанная участниками саммита, в том числе Россией – «Дей-

<sup>7</sup> Данные на февраль 2018 г. с официального сайта РКИК ООН unfccc.int

ствия G8 в сфере энергетики и изменения климата». Речь в ней шла об учете и контроле короткоживущих факторов антропогенного воздействия на окружающую среду, в том числе метана.<sup>8</sup>

Программа ООН по окружающей среде (United Nations Environment Programme, далее – ЮНЕП) 16 февраля 2012 г. объявила о старте новой международной инициативы – «Коалиции за климат и чистый воздух» (Climate and Clean Air Coalition, далее – Коалиция). Ее сооснователями являлись Бангладеш, Канада, Гана, Мексика, США, Швеция. Коалиция действует на основе «Рамочного соглашения о создании коалиции по совместным действиям» (Framework for the climate and clean air coalition to reduce short-living climate pollutants) [15]. Определяет стратегию работы и руководство Коалицией Ассамблея высокого уровня, проводимая ежегодно.

Целью Коалиции является реализация идеи снижения выбросов короткоживущих климатических загрязняющих веществ. Это новый шаг мирового сообщества в деле снижения антропогенного воздействия на климатическую систему. В Коалиции свои приоритеты и меры каждая страна определяет исключительно добровольно и самостоятельно. По форме соглашение о Коалиции не является юридически обязательным документом, в соответствии с которым страны должны предпринять те или иные действия или выделять определенные средства. Однако, формат документа предельно четкий и нацелен на практическую деятельность. В настоящее время членами коалиции является: 58 стран; 63 негосударственных объединений, в том числе 17 международных (в частности, Всемирный банк, ЮНЕП, Программа развития ООН, Организация экономического сотрудничества и развития), а также более 90<sup>9</sup> различных отдельных организаций как государственных, так и частных. Россия является членом Коалиции с 2014 года [15].

Во время проведения 22-й Конференции сторон в Марокко 14 ноября 2016 года Коалицией было представлено Марракешское коммюнике [16], принятое на 8-й сессии Ассамблеи высокого уровня. В нем она объявляет о намерении принять меры по сокращению короткоживущих факторов влияния на климат и призывает все страны принять эффективные меры для того, чтобы замедлить рост темпов изменения климата. Партнеры по Коалиции также взяли на себя обязательство сократить выбросы метана от операций с нефтью и газом.<sup>10</sup> До настоящего момента Россия к Марракешскому коммюнике не присоединилась.

На Саммите ООН по климату 2014 года в Нью-Йорке, США по инициа-

<sup>8</sup> Объективная оценка фактической роли метана в изменении климата является целью данной работы. (Ред.)

<sup>9</sup> Данные на февраль 2018 г. с официального сайта Коалиции <http://ccacoalition.org>

<sup>10</sup> Далее в данной работе будет дана оценка реального вклада выбросов метана от газовой промышленности

тиве Коалиции транснациональные нефтяные и газовые компании объявили о решении объединить свои усилия с правительствами и международными экологическими организациями с тем, чтобы сократить выбросы метана. В этих целях сегодня создано «Нефтегазовое партнерство по метану» (Oil and Gas Methane Partnership), вошедшее в Коалицию [18]. В него вошли как нефтегазовые компании, так и различные экологические организации, а также к инициативе присоединились правительства крупных нефте- и газодобывающих стран, в том числе России.

Дополнительно в ноябре 2017 года крупнейшие энергетические компании мира: BP, Eni, ExxonMobil, Repsol, Shell, Statoil, Total и Wintershall – подписали Руководящие принципы по снижению выбросов метана в производственно-сбытовой цепочке природного газа. В марте 2018 года к указанным принципам присоединилось ПАО «Газпром».

Согласно Руководящим принципам компании берут на себя следующие обязательства: постоянное сокращение выбросов метана; повышение эффективности работы по всем цепочкам создания стоимости газа; повышение точности данных о выбросах метана; пропаганда рациональной политики и правил, касающихся выбросов метана, и повышение прозрачности.

Сейчас во многих странах, особенно развитых, наблюдается тенденция к ужесточению отношения к выбросам ПГ и росту интереса к низкоуглеродным технологиям, в том числе при внедрении принципов устойчивого развития и повышения энергоэффективности. Этот процесс, несомненно, скажется на формировании новых международных инициатив и программ.



Содержание метана в атмосфере определяется соотношением процессов его поступления в воздух (эмиссиями) и выведения (стока) и зависит от их изменчивости во времени. Эмиссии формируются как за счет естественных биохимических и геохимических процессов, так и за счет антропогенных. Выведение метана из атмосферы (сток) определяется совокупной скоростью его химического разрушения в атмосфере и поглощения почвой (см. раздел 4).

В прошлом климат Земли не был постоянным. Палеоклиматические исследования в Антарктиде, а именно бурение антарктического льда на станции «Восток» и анализ полученного ледового керна, дают возможность в какой-то степени установить, как он менялся в различные эпохи. Результаты этого исследования были опубликованы международной группой авторов [17, 19 – 21]. В работе были реконструированы значения температуры за промежуток времени примерно 420000 лет. Результаты приведены на рис. 3.1.

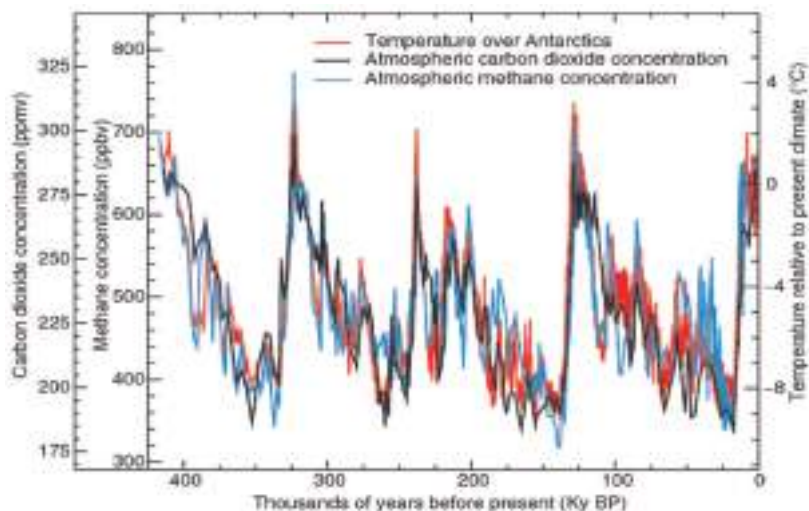


Рисунок 3.1. Изменения температуры и атмосферных концентраций метана и диоксида углерода, полученные по результатам анализа антарктических ледовых кернов, станция «Восток» (Barnola et al, 2003)

Как видно на рисунке, концентрация  $\text{CH}_4$  меняется циклически. Примерно каждые сто тысяч лет она достигает минимума – около 350 ppbv. Эти минимумы приблизительно соответствуют по времени великим оледенениям,

которые регулярно повторяются. После достижения точки минимума происходит быстрый подъем концентрации  $\text{CH}_4$  до величин 700–800 ppbv в течение примерно 10 000 лет, а затем идет постепенное, хотя и не монотонное понижение концентрации. Как видно на рисунке, это свойственно и концентрации углекислого газа  $\text{CO}_2$ . Сходно с поведением концентраций ведет себя температура. Согласно теории М. Миланковича [3], колебания температуры объясняются орбитальными факторами – циклическими изменениями свойств земной орбиты и положения земной оси относительно плоскости земной орбиты. Долгопериодные (развивающиеся на временах в десятки и сотни тысяч лет) колебания концентрации метана (и углекислого газа) – следствие этих изменений температуры.

В настоящее время палеореконструкции сделаны уже для промежутка времени примерно в 800 000 лет. Анализ газового состава пузырьков воздуха из ледяных кернов, отобранных в Антарктиде и Гренландии, позволил проследить эволюцию концентраций метана в атмосфере, а также температуры. Результаты приведены на рис. 3.2 [23].

Отметим, что концентрация метана до индустриальной эры (условно – до 1750 г.) никогда не превышала 800 ppbv. Поскольку до того интенсивность хозяйственной деятельности человечества была незначительной, наблюдаемая концентрация метана обеспечивалась только естественными процессами [23, 24].

Концентрация  $\text{CH}_4$ , как и двух остальных главных «антропогенных» парниковых газов –  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2\text{O}$  – меняется сходно в различных точках географического пространства. На рис. 3.3 приведены концентрации метана на станции Лоу-Доум в Антарктиде и в Гренландии с 1000 г. Это – результаты группы исследователей [25]; соответствующая публикация – [26]. На рис. 3.3 видно, что, во-первых, различия в концентрациях в Антарктиде и Гренландии невелики, и во-вторых, до начала индустриальной эры значение концентрации  $\text{CH}_4$  колебалось в пределах 625 - 675 ppbv, а начиная примерно с 1750 г., вышло из этого диапазона, начало систематически расти и к концу XX века достигло уровня примерно 1500 ppbv.

В настоящее время глобальные концентрации метана в приповерхностном слое достигли 1800 ppbv и более [27].

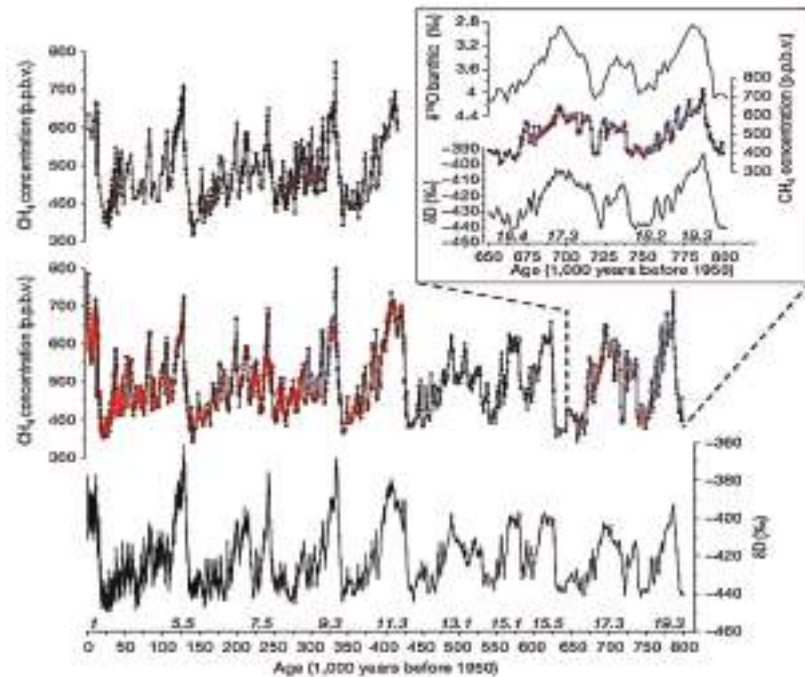


Рисунок 3.2. Изменения содержания метана в атмосфере за 800 тыс. лет (Loulerlegue et al., 2008). За начало обратного отсчета времени (левый край шкалы) взят 1950 год. *Верхняя коричневая линия* – концентрации метана по данным ледового керна со станции «Восток». *Средняя кривая* (красная, потом черная линии, и линии с голубыми точками) – по данным керна с купола «С» (черные точки – уже опубликованные ранее данные, красные – результаты анализа в Гренобле, синие – в Берне). *Нижняя черная кривая* – содержание дейтерия (пики соответствуют подъемам температуры). *На врезке вверху справа* – детально рассмотренные данные за период 650–800 тыс. лет назад: *верхняя кривая* – содержание дейтерия в морских осадках (показатель температуры океана); *средняя кривая* – содержание метана в атмосфере; *нижняя* – содержание дейтерия во льду с купола «С». Видна очень хорошая их сопряженность

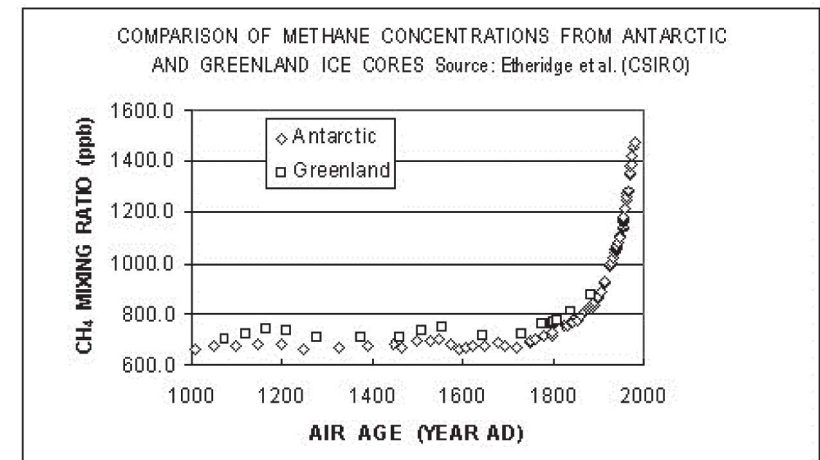


Рисунок 3.3. Ход концентрации метана с 1000 г. в Антарктиде и Гренландии (Etheridge et al, 2002)

Содержание метана в атмосфере определяется его поступлением в атмосферу и стоком из атмосферы. Напомним, что согласно п. 9 статьи 1 РКИК ООН [6] «Источник» означает *«любой процесс или вид деятельности, в результате которого в атмосферу поступают парниковый газ, аэрозоль или прекурсор<sup>11</sup> парникового газа»*. Здесь и далее, «сток» – любой процесс или вид деятельности, в результате которого парниковый газ, аэрозоль или прекурсор парникового газа удаляются из атмосферы.

В настоящее время практикуется два метода оценки источников/стоков парниковых газов: «снизу вверх» (bottom up) и «сверху вниз» (top-down).

Метод *«снизу вверх»* сводится к тому, что при определении суммарного выброса в атмосферу или же удаления из атмосферы изучаемого вещества, характерного для какой-то обобщенной географической или хозяйственной единицы (региона, сектора экономики), проводится измерение/оценка и последующее суммирование значений для ее составляющих. К сожалению, это – не всегда решаемая задача в силу разнообразных причин – отсутствия детализированных данных, инструментальных методов и т.д. Поэтому также употребляется метод *«сверху вниз»*, когда решается обратная задача – конструируется математическая модель процесса, позволяющая по наблюдаемым изменениям концентрации (которые измерять существенно проще, чем потоки вещества) количественно оценивать изменения входящих и исходящих потоков вещества. Естественно, получаемые оценки зависят от класса и особенностей используемой модели и часто заметно различаются у разных авторов.

Так как поступление метана в воздух полностью контролируется потоками с поверхности, то применение оценки «сверху-вниз» позволяет установить максимальное значение выбросов в исследуемом регионе. Использование дополнительных данных, например изотопных исследований, позволяет судить о мощности выбросов от отдельных классов источников. На глобальном и континентальном масштабах такие оценки считаются достаточно надежными. Недостатки этого подхода связаны с качеством метеорологических наблюдений и моделей, а также невозможностью достаточно подробно рассматривать отдельные виды источников, особенно антропогенных. При оценке же эмиссий «снизу-вверх» неполный учет источников может приводить к ошибкам при рассмотрении пространственно-временной изменчивости потока и соответствующих оценок. Эти два подхода могут быть применены для любых периодов времени (в том числе для прогнозных оценок) как в рамках одного региона, так и для всей Земли.

<sup>11</sup> «Прекурсор» – предшественник, транслитерация англ. «precursor»

При этом приведенные значения, полученные методом «снизу вверх», для глобального выброса метана выше, в основном из-за все еще обсуждаемого вопроса о возможной переоценке вклада геологических и водных источников. Следует отметить, что, к сожалению, некоторые процессы, ведущие к выбросам  $\text{CH}_4$ , ещё слабо изучены. При этом они часто отличаются высокой временной и территориальной изменчивостью и зависят от многих факторов, что в итоге может приводить к значительным расхождениям в оценках.

К настоящему времени существует множество отдельных исследований, включая измерения распределенных концентраций  $\text{CH}_4$  в атмосфере (как наземных, так и спутниковых) (см. раздел 6.2), его потока от различных источников и стоков, палеоклиматических данных (см. раздел 3), информации о биогеохимическом цикле метана и его изотопном составе. Однако только сведение этих данных в единый бюджет метана за соответствующий временной период и сравнение с наблюдаемым ростом его концентрации в атмосфере позволяет судить о корректности определения интенсивности процессов его образования, эмиссии в атмосферу и выводу из нее.

В связи с таким разнообразием информации, в качестве источников данных для настоящего отчета были выбраны материалы, разработанные несколькими признанными научными группами (в том числе МГЭИК, US EPA и GCRP<sup>12</sup>), занимающимися разработкой и сведением глобального бюджета метана. Использованные в отчете данные для составления глобального баланса метана в современное время (в период с 2000 г.) с применением различных подходов приведены в табл. 4.1. Исторические данные и реконструкции выбросов  $\text{CH}_4$  приведены в табл. 4.1, на рис. 4.1, 6.15 и 6.16. Прогнозирование его эмиссий на несколько десятилетий вперед рассмотрено в разделе 6.3.

## 4.1. ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ МЕТАНА

Химическим путем метан в атмосфере практически не образуется. Поэтому атмосферные источники  $\text{CH}_4$  можно не рассматривать и считать, что поступление метана в атмосферу полностью определяется его потоками с земной поверхности [31].

Метан в атмосфере по происхождению может быть [32]:

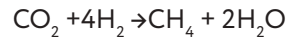
- биогенный, возникает в результате химической трансформации органического вещества (например, горения органики);
- бактериальный, образуется в результате деятельности метаногенных бактерий в донных отложениях болот и других водоемов, в желудках насекомых и животных (преимущественно жвачных);

<sup>12</sup> Межправительственная группа экспертов по изменению климата (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC - МГЭИК), United States Environmental Protection Agency (US EPA), The Global Carbon Project (GCP)

- термогенный, возникает в осадочных породах при их погружении на глубины 3-10 км, где органические вещества подвергаются химической трансформации в условиях высоких температуры и давления;

- абиогенный, возникает в результате химических реакций неорганических соединений, обычно на больших глубинах в мантии Земли.

По результатам оценки объемов образования метана, среди его источников преобладают процессы с участием анаэробных метаногенных бактерий, которые могут быть выражены результирующей формулой:



Молекулярный водород для протекания этой реакции выделяется бактериями, не генерирующими метан, но развивающимися в той же самой среде [31].

Источники метана обычно делят на две большие группы: естественные (т.е. природного происхождения) и антропогенные (образовавшиеся в результате деятельности человека). Некоторая часть источников может быть смешанного типа.

При определении суммарного количества  $\text{CH}_4$ , поступающего в атмосферу от каждого из источников, оценки разных авторов заметно различаются. Классификация источников и их состав так же имеют значение и могут отличаться для разных исследований. Кроме того, интенсивность выбросов  $\text{CH}_4$  изменяется со временем. Таким образом, рассматривать значения его эмиссий следует применительно к отдельным временным периодам и с учетом использованных методов и охвата источников.

Наибольший разброс глобальных оценок отмечен для природных источников  $\text{CH}_4$ , в том числе таких важных для России, как заболоченные территории и арктические моря. Антропогенные источники изучены несколько лучше.

Доминирующим естественным источником метана в настоящее время являются заболоченные территории. Они дают от 25 до 32% (данные 2000-2012 гг.) от всех его выбросов и при этом отличаются высокой временной изменчивостью и зависимостью от климатических факторов (обратная связь с климатом).

На долю антропогенных выбросов приходится по разным оценкам от 49 до 61% глобального выброса  $\text{CH}_4$  (данные 2000-2012 гг.). В этом глобальном выбросе часть, связанная с добычей и использованием ископаемого топлива, составляет 29-34%, природного газа – менее 10%.

#### 4.1.1. ЕСТЕСТВЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ

Ежегодно из естественных источников в атмосферу попадает, по разным оценкам, от 218 до 384 Мт  $\text{CH}_4$  (табл. 4.1). Среди них наиболее интенсивен поток  $\text{CH}_4$  с поверхности заболоченных территорий, составляющий до 80%.

Основными естественными источниками метана являются следующие [32, 33]:

- *Заболоченные территории (в т.ч. болота и термокарст).* Увлажненные почвы, содержащие большое количество органики и создающие анаэробные условия, способствующие деятельности метаногенных бактерий, являются значительным источником метана. Из них наиболее мощным источником этого газа являются болота (особенно тропические), так как они отличаются большой биопродуктивностью. Метан может выделяться из таких почв путем молекулярной диффузии, посредством пузырьков и через растения.

- *Поверхностные водные объекты (в т.ч. озера и реки).* Образование метана в пресноводных водоемах происходит в донных отложениях тем же путем, что на заболоченных (увлажненных) территориях. Наиболее активным источником метана считаются озера, при этом по сравнению с болотами их биопродуктивность примерно в 10 раз ниже.

- *Пожары.* При горении метан образуется в результате неполного сгорания биологического материала. Основной вклад в эмиссию метана дают пожары в саваннах и тропических лесах.

- *Жвачные животные.* Животные, особенно жвачные, являются достаточно интенсивным источником выделения метана благодаря процессу бактериальной ферментации, протекающему в их желудочно-кишечном тракте.

- *Насекомые.* Метан может выделяться в результате процессов пищеварения у наземных насекомых, способных к глубокой биохимической переработке клетчатки. К таким насекомым, прежде всего, относятся термиты.

- *Моря и океаны.* Источником выбросов метана в морях и океанах являются как донные отложения (по большей части для океанского шельфа и мелководных заливов), так и водная колонна. Существуют различные теории механизма таких выбросов, но в целом они считаются происходящими из-за анаэробного бактериального разложения органики. Кроме того, в океан могут поступать выбросы метана от геологических источников под его дном и от метангидратов.

Следует отметить, что заболоченные (увлажненные) территории, озера, пожары и животные могут быть элементами как природного комплекса, так и хозяйственного.

Помимо обычных источников метана – перманентных источников эмиссии метана – существуют так же его природные резервуары, содержащие боль-



шое количество этого газа, но в обычных условиях не дающие заметных выбросов в атмосферу. Однако на изменение условий, в том числе на изменение климата, они могут реагировать выбросами метана в атмосферу. Такими источниками являются [31 – 33]:

- *Многолетняя мерзлота.* Многолетнемерзлые породы содержат как уже образованный метан (во вмороженных в лед пузырьках воздуха), так и органические вещества. Метан содержится в мерзлоте и в пузырьках в смеси с воздухом и в виде гидратов метана (см. ниже). Его содержание в этих многолетнемерзлых породах составляет в среднем 2,3 мг/кг [32]. Такие породы содержат также большое количество мертвого органического вещества, способного служить материалом для образования метана в процессе жизнедеятельности метаногенных бактерий при положительных температурах, а в некоторых случаях – и при отрицательных.

- *Метангидраты.* Гидраты метана представляют собой твердые химические клатратные соединения метана с водой, устойчивые только в определенном диапазоне низких температур и высокого давления. В одном кубометре гидрата метана содержится эквивалент около 164 м<sup>3</sup> обычного газообразного метана. Газогидраты метана были обнаружены и на континентах, но большинство месторождений находится на шельфе океанов.

- *Месторождения газа и нефти.* Природный газ, содержащий метан, обычно подразделяется на три группы: природный газ чисто газовых месторождений, газ газоконденсатных залежей и попутный нефтяной газ. Метан при этом растворен в газовых флюидах или нефти, находящимся под давлением на больших глубинах. Наибольшее количество такого метана (до 90-97%) содержится в газе газовых месторождений, встречающихся в основном до глубин 1 500 м. Выделение метана естественным путем из таких источников может происходить благодаря диффузионным и струйным процессам.

- *Угольные месторождения.* Образование метана в осадочных породах происходит путем фактически пиролиза органических веществ в условиях высоких давлений и температур в процессе образования углей. Метан содержится в углях в различных формах, в том числе в виде растворов, в свободном состоянии, а также в адсорбированном виде. Он также содержится в породах, сопровождающих угольные пласты.

- *Другие глубинные геологические источники метана.* Выделение метана из земных пород может происходить также благодаря разнообразным геохимическим процессам: вулканическая деятельность; грязевый вулканизм; выделение вместе с водами минеральных и геотермальных источников; в форме сипов из мантии Земли; в виде струйных течений вдоль разломов земной коры. Выделение метана активизируется в районах с высокой сейсмической активностью.

Изменение природных ландшафтов и экосистем вследствие деятельности человека приводит к изменению потоков метана от них. Кроме того, повышение температуры планеты скажется на возрастании эмиссии CH<sub>4</sub>, так как изменение температуры на один градус меняет интенсивность его выделения в микробиологических процессах примерно на 10% [32].

#### 4.1.2. АНТРОПОГЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ

Ежегодно от антропогенных источников в атмосферу попадает, по разным оценкам, от 319 до 352 Мт CH<sub>4</sub> (данные 2000-2012 гг.). Распределение этих источников по объему выбросов метана и по годам приведено в табл. 4.1.

В качестве дополнительного источника данных об антропогенной эмиссии метана в научной литературе и в данном отчете используются результаты, полученные Агентством по защите окружающей среды США (таблица 4.1, [35]). На этой работе основаны различные прогнозные модели выбросов CH<sub>4</sub> до 2030 года как для оценки изменения климата, так и для обоснования применения различных технологий сокращения выбросов и их финансовой оценки (см. разделы 6.4 и 9 [34]).

В целом, антропогенные выбросы метана в каждой стране значительно изменяются со временем и зависят от таких основных факторов, как число жителей, уровень развития экономики и отдельных технологий. Антропогенные источники могут быть классифицированы по соответствующим секторам экономики: энергетика, промышленные процессы, сельское хозяйство и отходы. Следует учитывать, что состав источников, относимых к каждому сектору, и их классификация по отраслям у разных авторов может несколько отличаться, что может приводить к дополнительным различиям в итоговых данных.

В настоящее время наиболее значительными составляющими антропогенной эмиссии метана являются домашние животные – до 30% антропогенных выбросов, а также добыча и переработка нефти и газа – около 23%.

Основными антропогенными источниками метана являются следующие [28, 32, 35]:

- *Домашние животные.* Так же, как и дикие животные, домашние животные, особенно жвачные, являются источниками метана, образуемого в процессе пищеварения.

- *Рисовые поля.* Рисовые поля являются интенсивным источником метана, так как они значительное время покрыты водой, что создает благоприятные условия для развития анаэробных метаногенных бактерий. Считается, что метан поступает в атмосферу в основном через растения, так как без рисовых растений аналогично обработанные поля дают поток метана примерно в 50 раз меньше.

Таблица 4.1

**Выбросы метана от антропогенных источников, Мт(CH<sub>4</sub>) (EPA, 2012)  
за 1990 и 2005 годы (использован подход «снизу вверх»),  
а так же прогнозируемые выбросы на 2030 год  
(сценарий «Business as Usual»)**

Категории источников/год	1990	2005	2030
<b>Энергетика, всего</b> <i>в том числе:</i>	105,1	118,4	166,2
Добыча и переработка нефти и газа	60,9	73,5	100,6
Добыча угля	25,2	24,8	37,3
Сжигание ископаемого топлива	10,5	10,7	17,3
Сжигание биомассы	8,4	9,4	11,0
<b>Промышленные процессы</b>	0,4	0,4	0,3
<b>Сельское хозяйство, всего</b> <i>в том числе:</i>	142,1	144,5	166,9
Жвачные животные	84,0	90,2	110,5
Рисоводство	22,9	23,9	24,3
Обращение с навозом	11,1	10,4	12,0
Сжигание травы в саванне, сельскохозяйственных остатков, выбросы от пашни	24,1	20,0	20,0
<b>Отходы, всего</b> <i>в том числе:</i>	51,0	61,2	75,4
Захоронение твердых отходов	33,6	37,8	45,7
Обращение со стоками	16,8	22,7	29,0
другие способы обработки отходов	0,6	0,7	0,7
<b>Итого:</b>	<b>298,5</b>	<b>324,6</b>	<b>408,8</b>

- *Отходы.* Размещенные на свалках отходы являются заметным источником метана, так как они содержат достаточно много влажного органического материала, а внутри них создаются анаэробные условия, способствующие образованию метана с участием бактерий. При использовании методик компостирования, в том числе при обращении с навозом, так же выделяется значительное количество метана. Количество выделяемого метана уменьшается при применении специальных технологий улавливания и утилизации метана.

- *Сточные воды.* Обработка промышленных и бытовых стоков в биологических очистных сооружениях или отстойниках, где имеются анаэробные условия для развития метаногенных бактерий, приводит к выбросам метана. Количество выделяемого метана уменьшается при применении специальных технологий улавливания и утилизации метана.

- *Угольная промышленность.* При добыче угля из месторождений в атмосферу поступает метан как непосредственно выделяющийся при добыче угля, так и получаемый при дегазации угольных пластов, а также метан из шахт, где прекращена добыча. Количество выделяемого метана может быть уменьшено при применении специальных технологий для его извлечения и утилизации.

- *Горение биомассы и топлива.* При неполном сгорании органических веществ как при использовании топлива, так и при сжигании сельскохозяйственных остатков и других органических отходов выделяется метан. Его основной глобальный источник находится в Африке, где широко практикуется сжигание соломы при подготовке почвы для нового урожая.

- *Добыча, переработка, транспортировка, хранение и распределение природного газа и нефти* могут сопровождаться выбросами метана. Источниками метана при этом являются неплотности оборудования и технологическая необходимость стравливания газа при проводимых ремонтах, пусках-остановках оборудования на производственных площадках и т.д. Количество выделяемого метана уменьшается при применении мер против утечек и технологий утилизации попутного нефтяного газа.

Историческая реконструкция прошлых глобальных антропогенных эмиссий CH<sub>4</sub> была выполнена в работе [36] для периода времени 1860-1994 гг. Оценки были выполнены для следующих источников: сжигание попутного и технологического газа, газоснабжение, добыча угля, сжигание биомассы, животноводство, рисоводство и захоронение отходов.



## 4.2. СТОК МЕТАНА

Удаление (сток) метана из атмосферы происходит естественным путем вследствие химических (в атмосфере) и биохимических (в почве) процессов. С осадками удаление  $\text{CH}_4$  из атмосферы практически не происходит, вследствие его малой растворимости в воде.

Молекулы  $\text{CH}_4$  довольно устойчивы в атмосфере, не обладают высокой реактивной способностью и взаимодействуют лишь с очень активными единицами вещества – молекулами гидроксила  $\text{OH}$ , а также с атомами хлора  $\text{Cl}$  и возбужденными атомами кислорода  $\text{O}(^1\text{D})$ . Разрушение метана при реакции со свободными радикалами  $\text{OH}$  происходит преимущественно в тропосфере. В ходе диффузионного транспорта метан попадает в стратосферу и разрушается там в разнообразных химических и фотохимических процессах. При поглощении молекул метана из воздуха почвенными микроорганизмами он разрушается биохимическим путем. Этот процесс, в основном, происходит в сухих почвах лесов и степей [28, 32, 35].

Главным механизмом стока метана является его химическая реакция с гидроксил-радикалом  $\text{OH}$ , при которой из атмосферы ежегодно удаляется примерно 90% всех его поступающих эмиссий, что составляет примерно 9% от его общего современного содержания в атмосфере [28]. Более подробно эти процессы рассмотрены в разделе 16.

В качестве антропогенного «стока» может рассматриваться применение технологий улавливания и утилизации  $\text{CH}_4$  от антропогенных источников, а также некоторые случаи его добычи из естественных резервуаров для дальнейшего использования, однако объем таких процессов невелик.

## 4.3. СВОДНЫЕ ДАННЫЕ О СОВРЕМЕННОМ БЮДЖЕТЕ МЕТАНА

Соотношение интенсивности процессов выбросов и стоков метана определяет возможность его накопления в атмосфере и в итоге – концентрацию и ее рост, а также общее количество метана в атмосфере (см. табл. 4.3, разделы 3 и 6.2.).

Приведенные данные соответствуют наблюдаемому росту глобального содержания метана в атмосфере, так как его поступление в атмосферу превосходит удаление. При этом считается, что связанные с климатом колебания выбросов  $\text{CH}_4$  из естественных заболоченных территорий являются основным фактором, обуславливающим наблюдаемую глобальную межгодовую изменчивость выбросов  $\text{CH}_4$ . В этом отношении также играют определенную,

но менее значительную роль сжигание биомассы в те годы, в которые наблюдались обширные пожары [28].

Несмотря на ранее описанные сложности с получением данных о составляющих глобального бюджета метана, отмечается [37] весьма высокая степень достоверности того, что увеличение содержания  $\text{CH}_4$  в атмосфере с начала индустриальной эры до настоящего времени произошло в результате деятельности человека.

Таблица 4.2

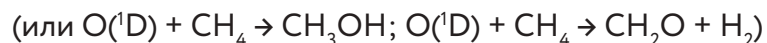
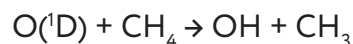
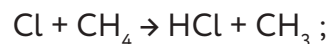
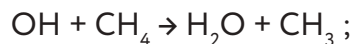
Глобальный бюджет метана за 2011 год (подход «снизу-вверх») (Saunois et al., 2016)

Категория	Размерность	Величина
Общее содержание $\text{CH}_4$ в атмосфере	Мт $\text{CH}_4$	4954±10
Атмосферный сток	Мт $\text{CH}_4$ /год	542±56
Атмосферный рост	Мт $\text{CH}_4$ /год	14±3
Все источники метана, в том числе:	Мт $\text{CH}_4$ /год	556±56
<i>Антропогенные</i>	Мт $\text{CH}_4$ /год	354±45
<i>Природные</i>	Мт $\text{CH}_4$ /год	202±35

Метан поступает в атмосферу в основном с земной поверхности, где расположены его естественные и антропогенные источники. Этот газ существенно легче воздуха, и он имеет тенденцию перемещаться из приповерхностного слоя в вышележащие слои атмосферы, чему в гораздо большей степени способствует также конвекция. В стратосфере  $\text{CH}_4$  «погибает» в ходе химических и фотохимических реакций, т.е. происходит безвозвратное его удаление из атмосферы.

Такая «судьба» метана согласуется с характером его вертикального распределения в атмосфере. Типичное такое распределение – по американской «стандартной атмосфере» [38] – приведено на рис. 5.1. В тропосфере, до высоты примерно 10 км, концентрация  $\text{CH}_4$ , выраженная объемным отношением смеси (volume mixing ratio – VMR<sup>13</sup>), мало меняется. Процессы, приводящие к гибели метана в тропосфере, протекают существенно медленнее вертикального физического перемешивания. В тропопаузе, в стратосфере и выше соотношение этих скоростей иное, что выражается в заметном убывании его содержания (VMR) с высотой.

Удаление  $\text{CH}_4$  из атмосферы происходит, в основном, химическим путем в реакциях с гидроксил-радикалом (OH), атомарным хлором (Cl) и возбужденным атомарным кислородом  $\text{O}(^1\text{D})$ . Приведем соответствующие реакции [32, 40]:



<sup>13</sup> В качестве единиц объемного отношения смеси для атмосферных газов чаще всего употребляются проценты (части на сотню – %), промилле (части на тысячу – ‰), части на миллион (parts per million – ppm), части на миллиард (parts per billion – ppb), части на триллион (parts per trillion – ppt)

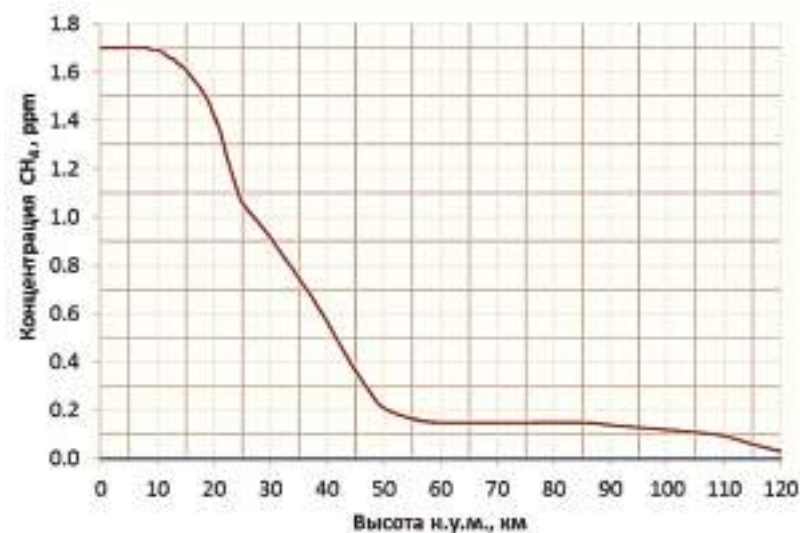
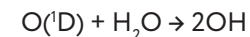


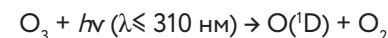
Рисунок 5.1. Типичное вертикальное распределение содержания метана: ось ординат – концентрация  $\text{CH}_4$  (ppm); ось абсцисс – высота над уровнем моря, км (U. S. Standard Atmosphere, 1976)<sup>14</sup>

В ходе химических реакций с **гидроксил-радикалом** OH из атмосферы удаляется примерно 90% общего стока [41 – 43].

Основной источник гидроксил-радикала OH в атмосфере Земли – взаимодействие возбужденного атома кислорода  $\text{O}(^1\text{D})$  с водой:



Возбужденные атомы кислорода  $\text{O}(^1\text{D})$  образуются при фотодиссоциации озона:



Если эта реакция требует достаточной интенсивности потока ультра-фиолетового или более жесткого излучения, а также достаточной концентрации озона, что в большей степени имеется в верхней атмосфере, то для протекания предыдущей реакции требуется наличие водяного пара, содержание которого

<sup>14</sup> На рисунке 5.1, как и на всех рисунках из иллюстрационных источников происхождения, в дробных значениях величин точку следует понимать как десятичный разделитель

с высотой резко убывает. Сочетание действия этих двух разнонаправленных факторов приводит все же к тому, что в верхней атмосфере содержание ОН выше.

На рис. 5.2 представлено типичное распределение содержания гидроксил-радикала по высоте над уровнем моря, соответствующее американской стандартной атмосфере [38]<sup>15</sup>. Эти данные примерно соответствуют 45° с.ш.

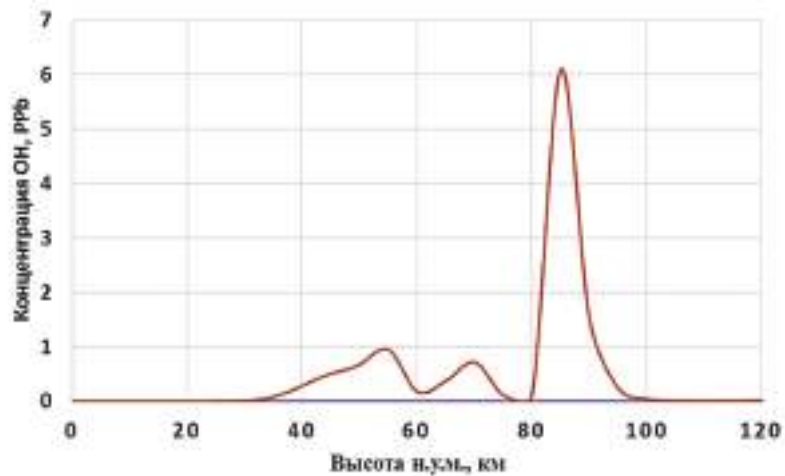
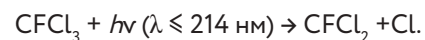
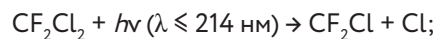


Рисунок 5.2. Типичное вертикальное распределение содержания гидроксил-радикала: ось ординат — концентрация ОН (ppb); ось абсцисс — высота над уровнем моря, км (U. S. Standard Atmosphere, 1976)

Разрушение метана в реакциях с **атомарным хлором** Cl происходит, в основном, на высотах выше 35 км. В формировании уровней содержания атомарного хлора Cl в атмосфере велика роль его предшественников антропогенного происхождения [44]. Это хлорфторуглероды (ХФУ), называемые также фреонами. Эти вещества используются в качестве хладагентов в холодильных установках и в производстве спреев для эффекта распыления. Под воздействием ультрафиолетового или более жесткого излучения они диссоциируют с образованием атомарного хлора. Например,



<sup>15</sup> <http://www.digitaldutch.com/atmoscalc/>; <http://www.spectralcalc.com/>

Атомарный хлор может появляться в атмосфере и по естественным причинам. Например, морская вода, вулканическая активность и лесные пожары могут быть источниками эмиссии  $\text{CH}_3\text{Cl}$ . Это вещество способно к рекомбинации на  $\text{CH}_3$  и Cl.

Вклад почвенного поглощения в общем стоке метана из атмосферы невелик.

Все эти процессы определяют время жизни метана в атмосфере. Согласно современным оценкам это 8 – 12 лет [31], 8-15 лет [40],  $9,1 \pm 0,9$  лет [45], 8-10 лет [29],  $9,3 \pm 0,9$  лет [46]. Обобщающая оценка Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) – 12,4 года (IPCC, 2013).

Метан является парниковым газом (его «парниковая» эффективность в расчете на единицу увеличения содержания в атмосфере превосходит эффективность углекислого газа, см. раздел 7). Однако, процессы выведения  $\text{CH}_4$  из атмосферы в свою очередь зависят от климата. В работе [40] показано, что время жизни метана в атмосфере с 1900 по 2005 г. сократилось вследствие потепления климата примерно на 3%. В работе [46] приводится большее значение сокращения для периода 1980 – 2000 гг.:  $4,3 \pm 1,9\%$ . Это могло способствовать некоторому замедлению роста содержания метана в конце XX века – начале XXI века (определенное замедление наблюдалось с конца 1990-х до 2007 г.).

## 6.1. ОСНОВЫ

Главным источником энергии в земной системе<sup>16</sup> является Солнце, потоки излучения которого достигают верхней границы земной атмосферы и далее проникают через нее к земной поверхности. Этот поток солнечного излучения к Земле равен в среднем  $341,3 \text{ Вт м}^{-2}$  на верхней границе атмосферы (условно – на высоте 200 км). Часть потока солнечного излучения отражается атмосферой и земной поверхностью обратно в космос, а поглощается примерно 70%. Средний геотермальный поток тепла через земную поверхность равен  $0,06 \text{ Вт м}^{-2}$ , т.е. на четыре порядка меньше.

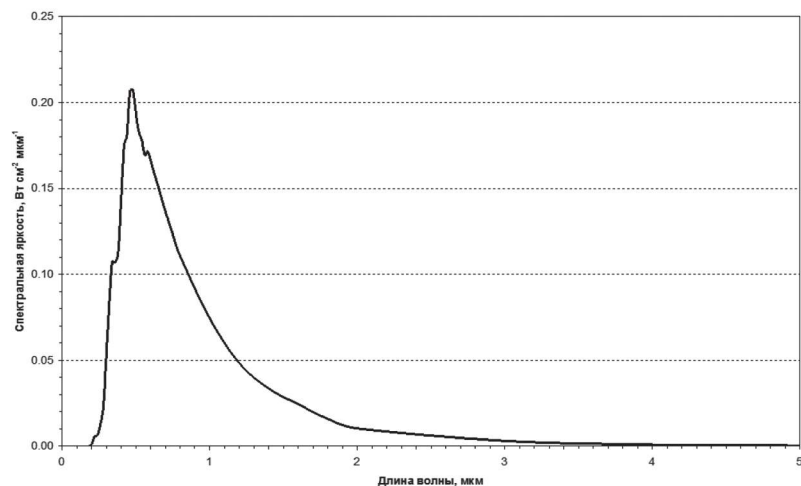


Рисунок 6.1. Распределение солнечного излучения (спектральная плотность) на верхней границе атмосферы по длине волны [47]

Спектральное распределение потока солнечного излучения на верхней границе атмосферы представлено на рис. 6.1. Видимый свет – часть этого потока. Монохроматические компоненты этого излучения имеют длину волны  $0,4 - 0,7 \text{ мкм}$ .

<sup>16</sup> «Земная система» – от англ. «the Earth's system», означает совокупность всех объектов в атмосфере, на земной поверхности и в земной толще и их взаимодействия, в том числе путем обмена массой и энергией

На рис. 6.2 приведен современный глобальный бюджет энергии в земной системе по работе [48].

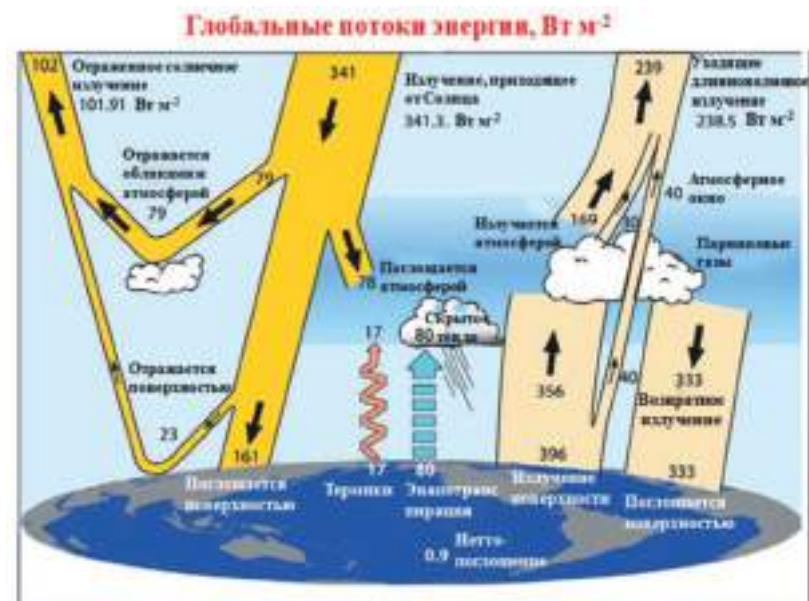


Рисунок 6.2. Потоки энергии ( $\text{Вт м}^{-2}$ ) в системе «атмосфера + земная поверхность» (Trenberth, Fasullo, Kiehl, 2009)

Солнечное излучение нагревает земную поверхность и, в гораздо меньшей степени, атмосферу. Как любые тела, они излучают энергию. Но значения температуры на земной поверхности и в атмосферных слоях невелики (около 300 К и менее) по сравнению с температурой на поверхности Солнца (около 6000 К). Поэтому земная поверхность и атмосферные слои излучают в совершенно ином диапазоне длин волн – инфракрасном диапазоне. На рис. 6.3 изображено расчетное спектральное распределение излучения земной поверхности при средней ее температуре 288,15 К.

Как видно на рис. 6.2, атмосфера пропускает в космос только около 10% инфракрасного излучения земной поверхности. Остальная часть на каких-то высотах поглощается атмосферными слоями. Эти слои излучают «вверх и вниз» практически целиком в инфракрасном диапазоне. В целом, из потока  $396 \text{ Вт м}^{-2}$ , излучаемого земной поверхностью,  $333 \text{ Вт м}^{-2}$  перенаправляется атмосферой обратно к земной поверхности. Эти свойства земной атмосферы создают эффект «парника», вследствие чего термические условия в при-

поверхностном слое достаточно комфортны. Поясним «парниковый эффект» на простом иллюстративном примере.

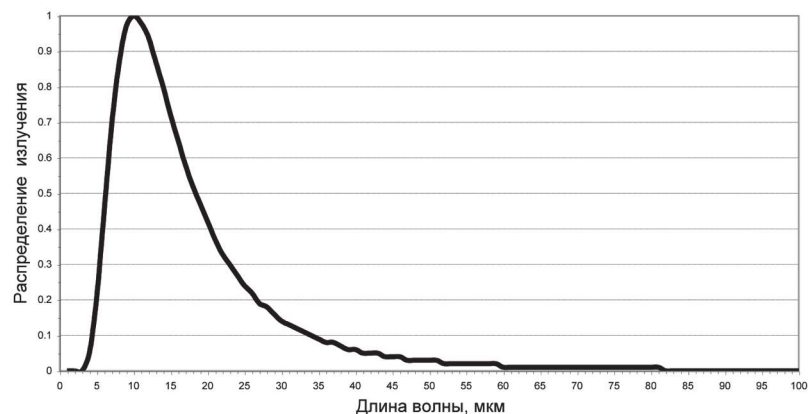


Рисунок 6.3. Расчетное распределение излучения абсолютно черного тела по длинам волн при температуре поверхности 288,15 К (Земля) в долях максимальной спектральной плотности<sup>17</sup>

На рис. 6.4 изображены потоки излучения двух типов – коротковолновый (солнечный, условно – с длиной волны  $\lambda < 3$  мкм) и длинноволновый, инфракрасный (излучение земной поверхности и атмосферных слоев, условно с длиной волны  $\lambda \geq 3$  мкм). Считается, что от Солнца приходит только коротковолновое излучение, а земное излучение – все длинноволновое.

На левой панели а) атмосфера отсутствует. Поток солнечной энергии  $S$  беспрепятственно достигает земной поверхности и нацело ею поглощается. Он разогревает ее до температуры  $T_0$ , при которой поток длинноволнового излучения земной поверхности  $L_0 = \sigma T_0^4$  (закон Стефана-Больцмана) станет равным потоку  $S$ , т. е. при радиационном равновесии  $S = \sigma T_0^4$ .

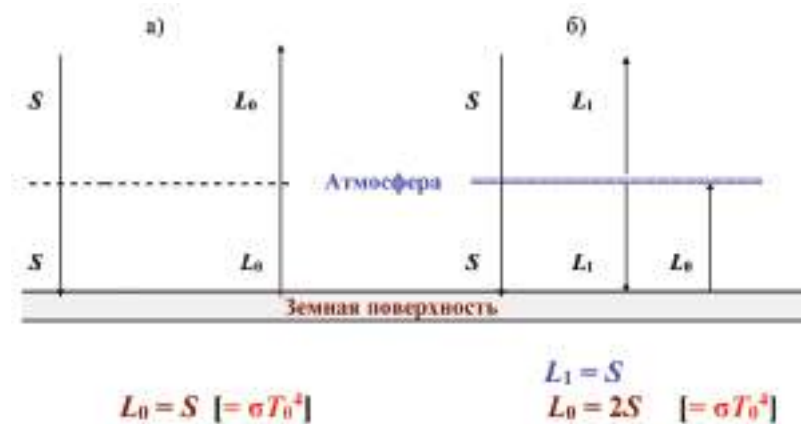


Рисунок 6.4. Иллюстративная радиационная модель парникового эффекта: земная поверхность полностью поглощает все потоки солнечного излучения  $S$ , а атмосфера – прозрачная для солнечного, коротковолнового излучения  $L_0$ , но совершенно непрозрачная для земного, длинноволнового излучения  $L_1$ . При наличии такой атмосферы равновесная температура земной поверхности больше той, что устанавливается в отсутствие атмосферы

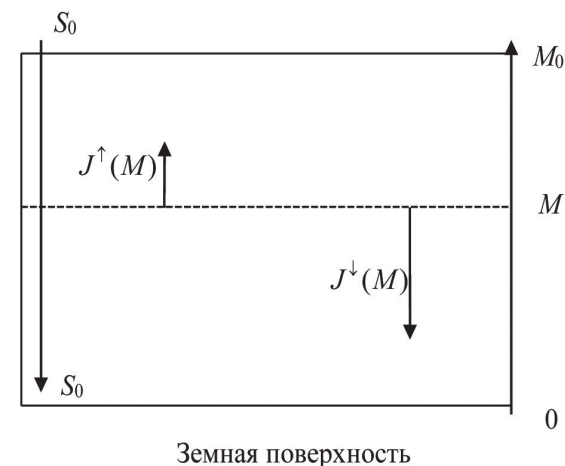


Рисунок 6.5. Иллюстративная радиационная модель, в которой горизонтально-однородная атмосфера имеет непрерывное распределение по вертикали; символы пояснены в тексте

<sup>17</sup> На рисунке 6.3 в дробных значениях величин точку следует понимать как десятичный разделитель



Восходящий и нисходящий потоки длинноволнового излучения на «высоте»  $M$  частично поглощаются атмосферным слоем массы  $dM$  ( $w(M)$  – коэффициент поглощения). Этот процесс описывают первые члены в правых частях приведенных ниже двух уравнений. В состоянии равновесия поглощенная энергия излучается вверх и вниз в равных долях. Это описывается вторыми членами уравнений.

$$\frac{dJ^\downarrow(M)}{d(-M)} = -w(M)J^\downarrow(M) + 0.5w(M)(J^\downarrow(M) + J^\uparrow(M)),$$

$$\frac{dJ^\uparrow(M)}{dM} = -w(M)J^\uparrow(M) + 0.5w(M)(J^\downarrow(M) + J^\uparrow(M)).$$

При этом  $S_0 + J^\downarrow(M) = J^\uparrow(M)$  – выполняется условие равновесия потоков лучистой энергии на «высоте»  $M$  (т.е. то, что находится до этой высоты, не нагревается и не охлаждается), а  $J^\downarrow(M_0) = 0$  – длинноволновое излучение не приходит к земной атмосфере извне. Эта система уравнений имеет следующие решения:

$$J^\uparrow(M) = S_0(1 + 0.5 \int_M^{M_0} w(x)dx); \quad J^\downarrow(M) = 0.5S_0 \int_M^{M_0} w(x)dx.$$

Восходящий поток длинноволнового излучения зависит от «высоты»  $M$  и среднего (средневзвешенного по массе) коэффициента поглощения  $W(M)$  на высотах от  $M$  до  $M_0$  следующим образом:

$$J^\uparrow(M) = S_0(1 + 0.5 \int_M^{M_0} w(x)dx) = S_0(1 + 0.5(M_0 - M)W(M)).$$

В данной модели на верхней границе атмосферы ( $M = M_0$ ) поток  $J^\uparrow(M)$  всегда равен  $S_0$  – земная система в целом не нагревается и не остывает.

В простейшем случае, когда коэффициент  $w$  поглощения не зависит от «высоты» ( $W = w = \text{const}$ ), поток  $J^\uparrow(M)$  возрастает линейно с массой вышележащего слоя атмосферы. При увеличении среднего коэффициента поглощения этот градиент становится круче – см. рис. 6.6.

Рис. 6.6 иллюстрирует усиление парникового эффекта при обогащении «толстой», распределенной по высоте атмосферы парниковыми газами, **в том числе метаном**, – ведь при таком обогащении значение коэффициента погло-

щения увеличивается, и приповерхностная температура возрастает. Поскольку парниковые вещества, привносимые человеком в атмосферу, – малые ее составляющие, то общая масса столба атмосферы  $M_0$  при расчете считалась неизменной.

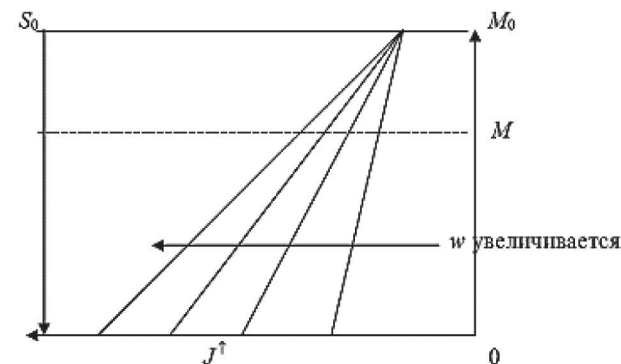


Рисунок 6.6. Изменение восходящего потока длинноволнового излучения в зависимости от «высоты»  $M$  и коэффициента поглощения  $w$

Усиление поглощения инфракрасного излучения атмосферными слоями при обогащении атмосферы метаном следует из того, что метан обладает выраженным свойством поглощать излучение в диапазоне 6,3 – 8,3 мкм (см. рис. 6.7), а излучение этого диапазона заметно представлено в общем потоке излучения земной поверхности – см. рис. 6.3.

Оценки, представленные на рис. 6.7, получены, исходя из данных международной спектроскопической базы экспериментальных данных HITRAN [51] в ее версии 2008 г.<sup>18</sup>

В таких экспериментах поток монохроматического излучения  $I_0$  направляется на прозрачную емкость, содержащую определенное количество исследуемого газа, и затем измеряется выходящий поток  $I$ . Коэффициент поглощения оценивается значением, пропорциональным  $[-\ln(I / I_0)]$ . Обычно нормирование производится путем деления этого значения на толщину емкости (по направлению луча) и концентрацию исследуемого газа. Значения коэффициента поглощения для метана на рис. 6.7 приведены в относительных единицах. При расчетах были использованы данные экспериментов, в которых давление было 1013,25 гПа, абсолютная температура 288,15 К, концентрация метана в емкости 0,01 ppm, толщина емкости (по направлению луча) 0,1 см.

<sup>18</sup> Данные экспериментов приведены на портале <http://www.spectralcalc.com>



Заметим, что метан обладает выраженным поглощением и в других частях спектра: вблизи 1,7, 2,2 и 3,3 мкм. Однако доля этого излучения в общем потоке излучения земной поверхности сравнительно мала – см. рис. 6.3.

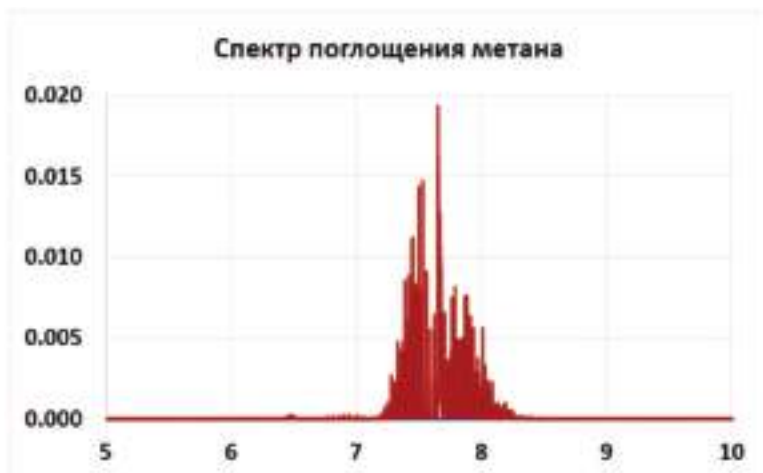


Рисунок 6.7. Спектр поглощения метана в диапазоне длины волны 6,3 – 8,3 мкм: по оси абсцисс – длина волны (мкм); по оси ординат – коэффициент поглощения (относительные единицы)

На рис. 6.8 [48] представлены результаты расчета радиационно-равновесной температуры земной поверхности при различных концентрациях метана (ось абсцисс, ppm) и том составе атмосферы в отношении остальных составляющих, который соответствует 1970 г. Нуль по шкале температуры – ось ординат – соответствует расчетной температуре 1970 г. Как видно на рис. 6.8, роль метана в формировании радиационно-равновесной температуры земной поверхности в диапазоне концентраций от 0 до значений на порядок больше современных заметна, но сравнительно невелика – его вклад не превышает 1°C.

Заметим, что оценки, представленные на рис. 6.8, получены в рамках радиационной модели. Учет иных, нерадиационных факторов, может изменить эти оценки. Среди таких факторов – возможная активизация конвективного оттока тепла от земной поверхности в вертикальном направлении и индуцированное потепление – обогащение атмосферы водяным паром и другими парниковыми газами. Например, увеличение содержания метана способствует росту концентрации другого парникового газа – озона как в тропосфере, так и в стратосфере [31 – 41]. Однако эффект совокупного действия всех этих факторов на температуру пока не ясен, действие их во многих случаях разнонаправленно.

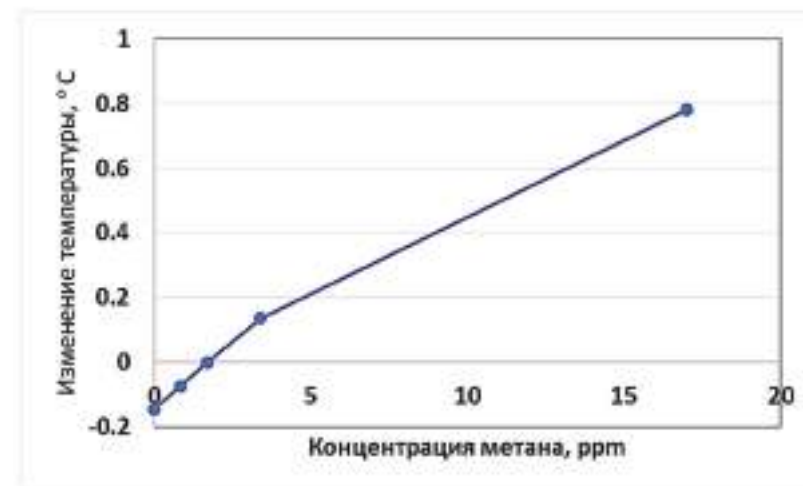


Рисунок 6.8. Изменение радиационно-равновесной средней температуры земной поверхности (ось ординат, °C) в ответ на изменение концентрации метана (горизонтальная ось, ppm) при условии сохранения состава атмосферного воздуха по остальным компонентам неизменным и соответствующим состоянию 1970 г.

За нуль оси ординат принята расчетная радиационно-равновесная температура 1970 г.

## 6.2. ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА В АТМОСФЕРЕ И ЕЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ИНДУСТРИАЛЬНУЮ ЭРУ

Как уже ранее было отмечено (см. раздел 4.2), концентрация метана в атмосфере в целом зависит от соотношений интенсивности процессов его поступления в атмосферу и выводу из нее. При этом наблюдаемые значения этих концентраций отличаются сезонной и широтной вариабельностью (рис. 6.9).

Отметим, прежде всего, что ход среднегодовых концентраций метана в приповерхностном слое (а значит и в тропосфере вследствие весьма малой изменчивости его содержания, выраженного в VMR, по высоте) сходен в различных фоновых условиях<sup>19</sup>. На рис. 6.9 представлено изменение концентрации метана (ppb) в весьма отдаленных друг от друга точках географического пространства, где расположены станции мониторинга, на которых произ-

<sup>19</sup> Фоновые условия характеризуются тем, что уровень содержания газа, наблюдаемый там, складывается не под воздействием какого-то определенного локального источника, а определяется процессами глобального переноса и перемешивания в атмосфере

водились систематические измерения [52, 82]. Они расположены в Ирландии, в США (Орегон/Калифорния), на Барбадосе, на Самоа, в Тасмании<sup>20</sup> (табл. 6.1). Измерения проводятся в рамках проекта AGAGE – Advanced Global Atmospheric Gases Experiment, который выполняется при поддержке Национального управления по авиации и исследованию космического пространства США (NASA, USA).

Таблица 6.1

## Координаты некоторых станций мониторинга проекта AGAGE

Страна или территория	Название станции мониторинга	Широта	Долгота
Австралия, Тасмания	Cape Grim	41° ю.ш.	145° в.д.
Ирландия	Adrigole/Mace Head	52° / 53° с.ш.	10° з.д.
США, Орегон/Калифорния	Cape Meares / Trinidad Head	45°/ 41° с.ш.	124° з.д.
Барбадос	Ragged Point	13° с.ш.	59° з.д.
Американское Самоа	Cape Matatula	14° с.ш.	171° з.д.

Представленный на рис. 6.9 ход фоновых концентраций метана показывает, что:

- концентрации в Северном полушарии несколько превосходят (на 100-200 ppb) значения, наблюдаемые в Южном полушарии;
- в 2000-2007 гг. наблюдалась пауза в росте концентраций метана – концентрации были стабильны.

Первое можно объяснить тем, что основные естественные и антропогенные источники метана находятся на континентах, а океанский выброс сравнительно невелик (см. табл. 4.1). И поскольку в Северном полушарии доля земной поверхности, приходящаяся на сушу, больше, чем в Южном, то и фон метана несколько выше.

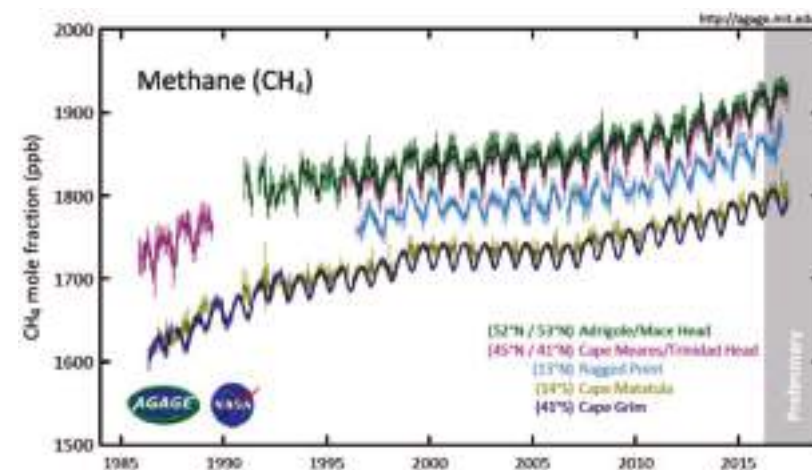


Рисунок 6.9. Современное изменение среднемесячных концентраций метана (ppb) по данным проекта AGAGE (Prinn et al., 2000, 2016): данные измерений в Ирландии, в США (Орегон/Калифорния), на Барбадосе, на Самоа, в Тасмании; данные проекта AGAGE (<http://agage.eas.gatech.edu/>)

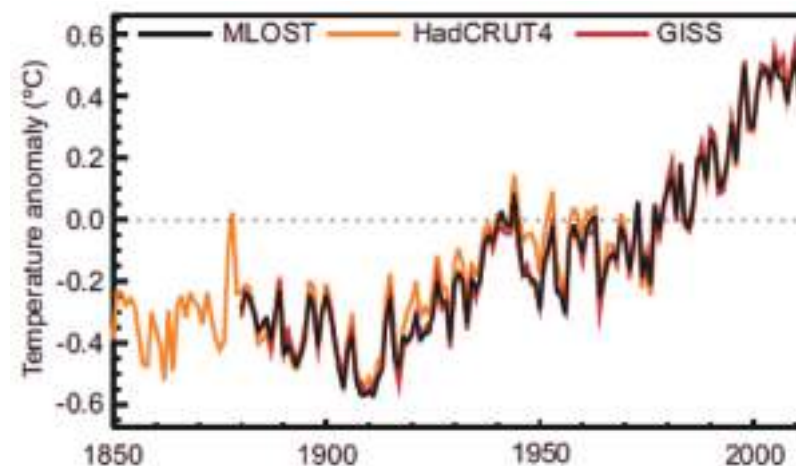


Рисунок 6.10. Ход средней глобальной температуры (изображены три различных ряда данных наблюдений – MLOST, HadCRUT4 и GISS) в приповерхностном слое в 1850-2012 гг. по отношению к среднему значению за 1961-1990 гг. (IPCC, 2013, p. 193)

<sup>20</sup> <http://agage.eas.gatech.edu/>

Период стабильности глобальных уровней метана в 2000-2007 гг. может объясняться наличием обратной связи между температурой и процессами рождения и гибели метана. В этот период времени темпы роста глобальной температуры существенно снизились, даже наступил некоторый период направленной изменчивости – см. рис. 6.10. Однако после 2007 г. рост глобальной концентрации метана возобновился – см. рис. 6.11.

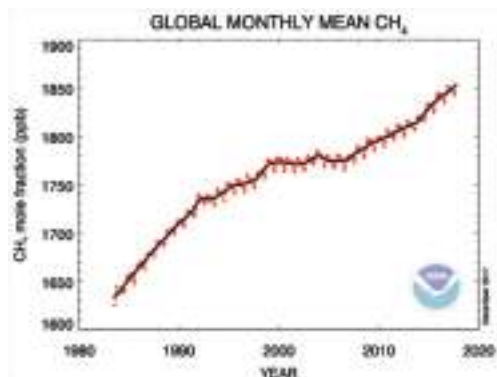


Рисунок 6.11. Изменение среднемесячных глобальных значений концентрации  $\text{CH}_4$  в приповерхностном слое (Dlugokencky, NOAA/ESRL ([www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends\\_ch4/](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends_ch4/); Nisbet et al., 2016)

На рис. 6.12 показаны темпы роста содержания метана в атмосфере в период между 1984 и 2014 гг. по данным фоновых измерений [27]. С середины 1980-х по 1991 год концентрация метана возростала больше чем на 10 ppb в год. Потом, примерно на десятилетие, рост замедлился и составлял не более 3 ppb в год. В период между 2000 и 2007 годами концентрация метана в атмосфере стабилизировалась. Однако начиная с 2007 года, она вновь начала расти, до 2013 года ее рост составлял около 5,7 ppb в год.

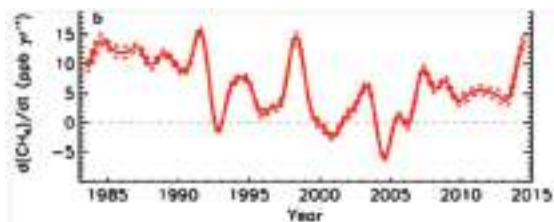


Рисунок 6.12. Темпы роста содержания метана в атмосфере в 1984-2014 гг. (Nisbet, 2016)

На рис. 6.13 представлены глобальные концентрации метана за последние 800 000 лет. Эти данные представлены Агентством по защите окружающей среды США<sup>21</sup> (Environmental Protection Agency, USA) и являются результатами палеорекострукций с использованием различных ледовых кернов, а также инструментальных фоновых измерений. На рисунке видно, что в последние 800 000 лет, исключая индустриальную эру (условно – с 1750 г.), концентрации метана менялись в пределах 300 – 800 ppb (см. левую панель рис. 6.13). В индустриальную эру наблюдался рост концентрации, которая к настоящему времени достигла 1800 ppb и превзошла этот уровень. Таким образом, рост концентрации метана составил более 250% (см. так же раздел 3). Напомним, что рост концентрации углекислого газа за соответствующий период составил лишь около 40%.

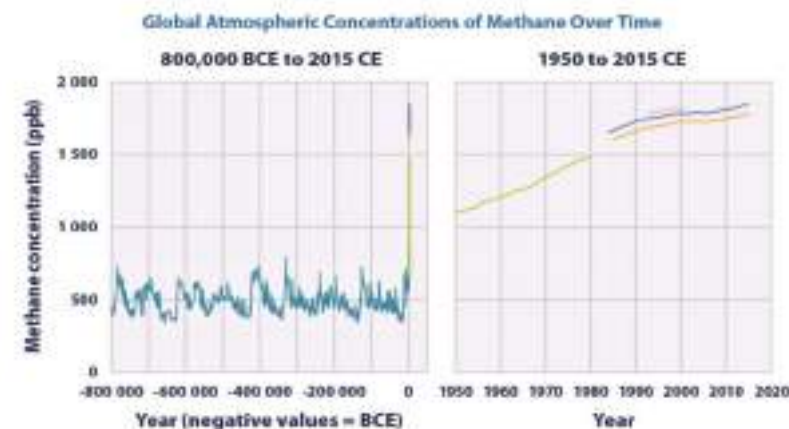


Рисунок 6.13. Естественные колебания глобальной концентрации метана в последние 800 000 лет и ее рост в индустриальную эру (<https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-atmospheric-concentrations-greenhouse-gases>)

На рис. 6.14 представлены данные о ходе в индустриальный период (с 1750 г. по настоящее время) среднегодовых глобальных концентраций трех главных антропогенных парниковых газов – углекислого  $\text{CO}_2$ , метана  $\text{CH}_4$  и закиси азота  $\text{N}_2\text{O}$ . На рисунке видно, что наиболее существенное относительное увеличение присуще именно метану.

<sup>21</sup> <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-atmospheric-concentrations-greenhouse-gases>

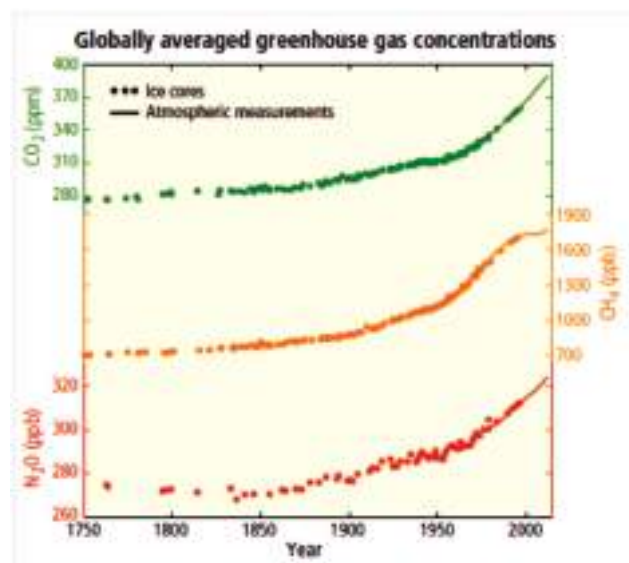


Рисунок 6.14. Глобальные концентрации углекислого газа  $\text{CO}_2$  (зеленый цвет), метана  $\text{CH}_4$  (оранжевый цвет) и закиси азота  $\text{N}_2\text{O}$  (красный цвет) – данные реконструкций по ледовым кернам и результаты инструментальных измерений (IPCC, 2014)

Существует весьма высокая степень достоверности того, что такое увеличение содержания метана в атмосфере в индустриальный период произошло в результате хозяйственной деятельности (см. разделы 3 и 4.1, 4.3). По оценкам МГЭИК [53], примерно 48–65% глобальной современной эмиссии метана в период 1990 – 2009 гг. приходились на антропогенный выброс (или 47–61% для периода 2000–2013 гг., по сведениям различных авторов, приведенным в данном отчете в разделе 4).

### 6.3. СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ И ПРОГНОЗУ ЭМИССИИ И КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА

Чтобы составить представление о будущих концентрациях метана, необходимо заложить определенные представления о:

- его глобальном выбросе в атмосферу и
- процессах его удаления из атмосферы.

Обе составляющие глобального выброса (эмиссии) метана прогнозировать достаточно сложно в силу неопределенностей разной природы (см. раздел 4).

Глобальная естественная эмиссия подвержена влиянию климатических условий. При ее оценке, вообще говоря, необходимо учитывать обратную связь с климатом. При потеплении и увеличении влажности естественная эмиссия метана с поверхности суши увеличивается, что может приводить к росту концентрации метана в атмосфере. Это неоднократно происходило в последний миллион лет – см. рис. 3.1.

Глобальная антропогенная эмиссия связана с хозяйственной деятельностью, с мировым экономическим развитием. Делать прогнозы экономического развития, в буквальном смысле слова, на климатические сроки – на десятилетия – не реалистично.

В силу всех этих причин ход выбросов и концентраций метана в будущем можно описать только в рамках некоторых модельных представлений о процессах эмиссии его в атмосферу и удаления из атмосферы. Основой для описания будущих глобальных выбросов (эмиссий) являются так называемые сценарии мирового развития. Приведем определение понятия «сценарий», которое дает МГЭИК в Пятом оценочном докладе во вкладе Рабочей группы I<sup>22</sup> (IPCC, 2013, Glossary): «Правдоподобное описание будущего развития, основанное на согласованной и внутренне непротиворечивой совокупности предположений о ключевых движущих силах (например, темпе технологического развития, ценах) и зависимостях».

Сценарии могут иметь различный временной горизонт – быть краткими и среднесрочными (на срок до 2030 года) или долгосрочными (на сроки после 2030 года). Они могут различаться подходом к долгосрочному моделированию (оптимизационные и имитационные модели), степенью детализации процессов, сопровождающихся выбросами метана, гибкостью отражения набора мер по контролю за их выбросами<sup>23</sup>. В сценарии закладываются предположения по широкому набору параметров, определяющих динамику выбросов метана.

К характеристикам таких сценариев можно отнести демографические и экономические параметры (население, цены на энергоносители, объемы добычи углеводородов и т.п.), меры по контролю выбросов и последствия их применения в различных отраслях экономики, а также внедрение новых техноло-

<sup>22</sup> Заметим, что и Рабочая группа II, и Рабочая группа III МГЭИК придерживались того же определения: A plausible description of how the future may develop based on a coherent and internally consistent set of assumptions about key driving forces (e.g., rate of technological change, prices) and relationships

<sup>23</sup> <http://institutions.com/strategies/2521-zatraty-vygody-realizacii-strategij-nizkouglerodnogo-razvitiya-rossii.html>



гий [53 – 55]. В силу объективных причин (процессы антропогенной эмиссии метана еще не полностью изучены, а также подвержены влиянию множества меняющихся во времени факторов), достоверно установить параметры будущего социально-экономического развития не представляется возможным. Вследствие чего составляется серия возможных сценариев – от «наихудших» до «наилучших» [53 – 56].

Зачастую моделирование и прогнозирование производится отдельно по каждому сектору экономики, либо региону с последующим суммированием результатов [57, 58].

В зависимости от эффективности предполагаемых к применению мер по снижению выбросов парниковых газов, в частности метана, в различных секторах экономики можно выделить основные классы сценариев – моделей экономического развития [56, 58, 59]:

- **BASE** является искусственным. Его цель – показать потенциал энергосбережения за счет перехода на новые технологии. Очевидно, что при обновлении основных средств и расширении производства инвестиции будут направляться в наиболее современные доступные технологии, являющиеся более эффективными, что представлено сценарием BAU.

- **Business-as-Usual (BAU)** сценарий не предполагает дополнительные меры по снижению выбросов по секторам экономики, кроме тех, что уже реализованы на момент составления прогнозов. BAU является сценарием минимальных издержек. Он чаще используется для построения базовой линии выбросов при оценке возможностей сокращения выбросов.

- **Прочие сценарии** – предполагают реализацию специальных мер, направленных на ограничение выбросов метана. Соответственно, прогнозы, выполненные на основе данной группы прогнозов, будут характеризоваться наиболее оптимистичными результатами.

Отдельно стоит выделить долгосрочные сценарии возможного социально-экономического развития, разработанные МГЭИК. Сценарии МГЭИК предназначены не столько для исследования динамики выбросов парниковых газов, сколько для комплексной оценки будущих возможных изменений климата. В связи с этим, сценарии МГЭИК более сложные и учитывают более широкий набор входных параметров по сравнению с представленными выше [53, 55, 60].

Для учета неопределенностей, связанных с глобальным социально-экономическим развитием в будущем, МГЭИК катализировала разработку мировым научным сообществом группы сценариев и оценку соответствующих траекторий антропогенных эмиссий климатически активных веществ, прежде всего, парниковых газов.

Первое семейство долгосрочных сценариев социально-экономичес-

кого развития (IS92), на основе которых получены перспективные оценки антропогенных выбросов парниковых газов, в том числе метана, были разработаны мировым научным сообществом и обобщены МГЭИК в 1992 году [61, 62]<sup>24</sup>. Семейство включает шесть сценариев, основанных на широком спектре предположений относительно значений ряда социальных, экономических и экологических параметров, которые влияют на выбросы парниковых газов, в частности, метана. Эти сценарии не включали в себя мер, дополнительных к существующим. Предположения, которые были заложены в этих сценариях, по большей части были взяты из публикаций профильных международных организаций. Некоторые из них были близки к сценариям SA90, которые были использованы при подготовке Первого оценочного доклада МГЭИК [63].

В сценариях IS92 предполагается рост мирового народонаселения до 11,3 млрд к 2100 году при среднем за XXI век росте мировой экономики в 2,3% в год. При этом будут использоваться и традиционные, и возобновляемые источники энергии. Эти сценарии широко использовались во Втором оценочном докладе МГЭИК (см. резюме – [64]).

В 2000 г. был выпущен Специальный доклад по сценариям выбросов – СДСВ, в английском оригинале – Special Report on Emission Scenarios (IPCC, 2000). В нем были предложены 4 «основные сюжетные линии» (storyline), в которых будущий мир качественно описывался по-разному (далее – «основные линии»). Эти четыре основные линии породили четыре семейства сценариев: A1, A2, B1 и B2. Опишем их кратко, следуя [60].

**A1.** Основная линия и сценарии этого семейства предполагают быстрый экономический рост, быстрое внедрение новых эффективных технологий, а также рост народонаселения до середины XXI столетия и последующее его уменьшение. Основными чертами развития будут: сближение регионов, существенное уменьшение региональных различий в доходах на душу населения, усиление культурных и социальных взаимодействий, а также создание новых возможностей. Сценарии этого семейства делятся на три группы, различающиеся по энергетическому «акценту»: A1FI – интенсивное использование ископаемого топлива, A1T – интенсивное использование иных видов топлива, A1B – сбалансированное использование всех видов топлива.

**A2.** Основная линия и сценарии этого семейства описывают весьма неоднородный мир. Регионы (и страны) ориентируются на свои силы, на сохранение местных особенностей. Темпы рождаемости в различных регионах сближаются очень медленно, что приводит к сохранению роста глобального народонаселения. Экономическое развитие будет в основном регионально ориентированным, а рост подушного дохода и технологические изменения будут более фрагментированными, чем для других семейств сценариев.

<sup>24</sup> <http://sedac.ipcc-data.org/ddc/is92/>

**B1.** Основная линия и сценарии этого семейства описывают такой же изменяющийся мир с такой же динамикой народонаселения, как и основная линия семейства A1. Однако при этом предполагаются быстрые изменения в экономической структуре в пользу обслуживающего и информационного компонентов при сокращении материалоемкости и при внедрении чистых и ресурсосберегающих технологий. Упор будет делаться на глобальные решения экономических и социальных проблем, на поддержании окружающей среды в устойчивом состоянии, включая меры по улучшению положения в области равноправия (регионов, стран). При этом новых инициатив в области регулирования климата не предполагается.

**B2.** Основная линия и сценарии этого семейства описывают мир, в котором упор делается на локальные решения в области поддержания устойчивости экономики, социальной сферы и окружающей среды. Глобальное народонаселение будет неуклонно возрастать с темпом меньшим, чем для A2. Темп развития экономики будет средним. Изменения в технологиях будут более медленными и более разнообразными, чем для основных линий семейств B1 и A1. Хотя сценарии этого семейства также ориентированы на защиту окружающей среды и социальную справедливость, они ориентируются в этом отношении на региональные уровни.

На основе этих качественных, словесных описаний будущего мира шестью группами специалистов в области математического моделирования было разработано сорок сценариев, дающих разные траектории эмиссий климатически активных веществ в атмосферу. Разработчики считают, что все эти сценарии являются одинаково обоснованными.

Это – так называемые «иллюстративные сценарии». Они включают сценарии-маркеры (marker scenario), отражающие основные черты четырех групп сценариев A1B, A2, B1 и B2, а также два дополнительных для групп A1FI и A1T. Следует заметить, что термин «иллюстративный», не очень удачный здесь в его русском значении в контексте сценариев эмиссий, не надо воспринимать, как «искусственный». Напротив, иллюстративные сценарии количественно выражают самую суть тех предположений, которые были сделаны при словесном описании основных «сюжетных линий» соответствующих групп сценариев.

Если бы каждому из этих сценариев была приписана, пусть субъективно, вероятность его реализации, их можно было бы использовать для построения вероятностного прогноза климата XXI века. Однако никаких конкретных вероятностей определено не было. Поэтому разброс оценок эмиссий, а – после соответствующего модельного пересчета – и концентраций и параметров климата в будущем, невозможно интерпретировать в вероятностных терминах, в частности, говорить о сколько-нибудь надежном прогнозе.

Сценарии SRES использовались при подготовке Третьего и Четвертого

оценочных докладов МГЭИК, которые вышли в 2001 и 2007 годах соответственно.

За время подготовки Пятого оценочного доклада МГЭИК (2009-2014 гг.) мировым научным сообществом были разработаны новые сценарии социально-экономического развития – RCP (representative concentrations pathways – репрезентативные траектории концентраций) [53, 55]. Семейство состоит из четырех сценариев: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 и RCP8.5. Они маркированы (числа в конце символа сценария) изменениями радиационного воздействия (radiative forcing), которые достигаются к 2100 году по сравнению с доиндустриальными значениями (+ 2,6, +4,5, +6,0 и +8,5 Вт/м<sup>2</sup> соответственно) [53, 65].

Невозможность осуществления долгосрочного (на 100 лет и более) прогноза социально-экономического развития (в буквальном понимании термина прогноз) и, как следствие, траекторий эмиссий климатически активных веществ привела к введению в научный обиход термина «перспективная оценка» или «проекция» (в англоязычной литературе – projection). По существу, это – условный прогноз, т.е. прогноз при определенных принятых условиях, при определенном сценарии условий в будущем, в рамках которого происходит изменение прогнозируемой переменной. Различные проекции для XXI века глобального антропогенного выброса метана в атмосферу и соответствующие последствия для уровней содержания метана будут рассмотрены в следующем разделе.

## 6.4. СЦЕНАРИИ ЭМИССИИ И КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА

На рис. 6.15 представлены ретроспективные оценки антропогенной эмиссии метана за период 1990-2005 гг., а также прогнозные оценки выбросов для последующих лет до 2030 года с шагом в 5 лет. Прогнозы выполнены Агентством по защите окружающей среды США (Environmental Protection Agency – EPA) с использованием сценария BAU. Этот сценарий является относительно краткосрочным для целей прогнозирования изменения климата, однако его подробная разработанность в плане вклада отдельных антропогенных источников позволяет рассматривать применение различных мер по снижению выбросов от них, см. раздел 9.

На рисунке видно, что выбросы после 2005 г. увеличиваются практически равномерно – с постоянным темпом – и к 2030 году достигают величины 408 Тг. При этом вклад России в среднем за весь период не превышает 8%. На рис. 6.16 представлены вклады различных секторов экономики в эти эмиссии.



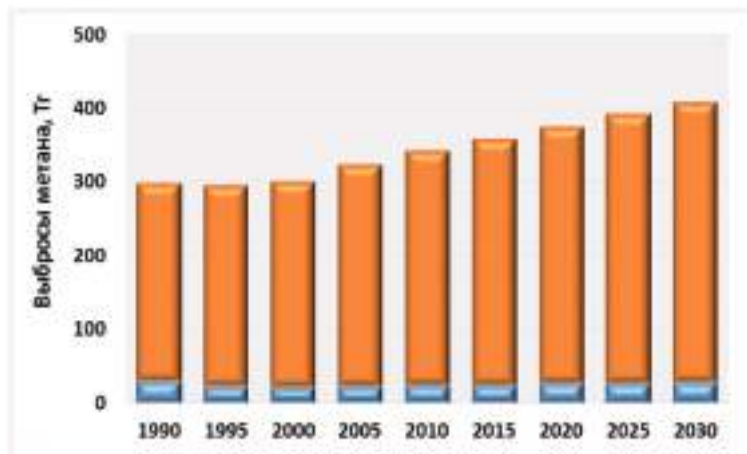


Рисунок 6.15. Оценки глобальных антропогенных выбросов метана в Мт  $\text{CH}_4$  (оранжевым цветом) до 2030 года с выделенной долей Российской Федерации (голубым цветом). Диаграмма составлена по данным Агентства по защите окружающей среды США (EPA, 2012)

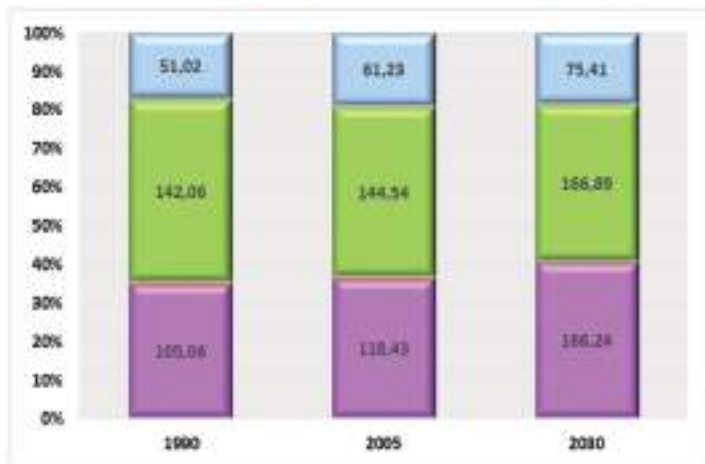


Рисунок 6.16. Глобальные антропогенные выбросы метана в Мт  $\text{CH}_4$  в 1990, 2005 и 2030 годах с детализацией по основным секторам экономики – источникам эмиссии метана. Вклады показаны различными цветами: энергетики (голубым), сельского хозяйства (зеленым), отходов (сиреневым). Диаграмма составлена по данным Агентства по защите окружающей среды США (EPA, 2012)

Согласно данным, приведенным на рис. 6.16, в 2030 году основные вклады в глобальные антропогенные выбросы метана будут приходиться на сельское хозяйство (кишечная ферментация и рисоводство), отходы (твердые отходы и сточные воды) и энергетику (главным образом, на нефтегазовый и угольный сектора). На этом отрезке времени согласно данной перспективной оценке вклады секторов экономики в выбросы метана останутся практически без изменений относительно текущих значений и составят 39,0%, 39,6% и 21,4%, соответственно, для секторов энергетики, сельского хозяйства и отходов.

Глобальные антропогенные выбросы метана, соответствующие шести сценариям семейства IS92, описаны в работах [61, 62]; и представлены на рис. 6.17. Соответствующие данные размещены на сайте <http://sedac.ipcc-data.org/ddc/is92/>. Как видно на рисунке, в семействе IS92 можно выделить «наихудшие» - IS92e и IS92f - и «наилучшие» сценарии в отношении выбросов метана - IS92c и IS92d. Самые высокие выбросы метана в конце нашего столетия соответствуют сценарию IS92e, который, среди прочих допущений, сочетает умеренный рост населения, высокий экономический рост, высокую доступность ископаемого топлива и возможный отказ от ядерной энергии. Выбросы метана при данном сценарии превысят 1100 Мт  $\text{CH}_4$  к концу XXI века.

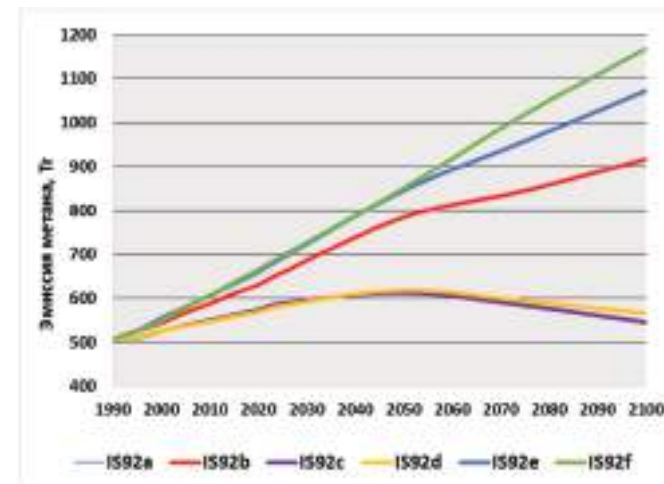


Рисунок 6.17. Глобальные антропогенные выбросы метана (Мт  $\text{CH}_4$ ) до 2100 года, построенные на базе сценариев семейства моделей IS92. Составлено по данным работ (Leggett J. et al, 1992; Pepper et al, 1992)

Для сценариев IS92c и IS92d предполагается, что население вначале растет, а затем к середине следующего столетия сокращается, экономический

рост – низкий, и существуют серьезные ограничения на поставку ископаемого топлива. При этом антропогенные выбросы метана в середине XXI века на какое-то время несколько превысят уровень 600 Мт  $\text{CH}_4$  в год, но в целом будут ниже этого уровня.

Отдельно стоит выделить «промежуточный» сценарий IS92a, который широко используется до настоящего момента для сопоставления с результатами более современных моделей в качестве стандартного. В IS92a заложен рост населения до 11,3 млрд человек к 2100 году, а экономический рост в среднем составляет 2,3% в год между 1990 и 2100 годами с использованием традиционных и возобновляемых источников энергии [53, 55, 61]. Согласно IS92a уровень выбросов метана к 2100 году незначительно превысит 900 Мт  $\text{CH}_4$  в год.

Траектории выбросов метана, изображенные на рис. 6.18, соответствуют (кроме IS92a) сценариям, представленным в Специальном докладе МГЭ-ИК о сценариях выбросов [60]. «Наилучшие» сценарии демонстрируют рост объема выбросов до середины столетия с последующим спадом. При «наихудших» сценариях происходит рост объема выбросов метана в течение всего периода 1990–2100 гг.

Разброс оценок на рис. 6.18 достаточно велик. К 2100 г. эмиссии, соответствующие разным сценариям, могут отличаться в разы, а то и на порядок и более. Такие значительные различия в траекториях эмиссий неизбежно порождают существенное расхождение траекторий концентраций, особенно в конце рассматриваемого периода времени – в 2100 г., что, в свою очередь, приводит к существенным различиям в оценках будущего климата.

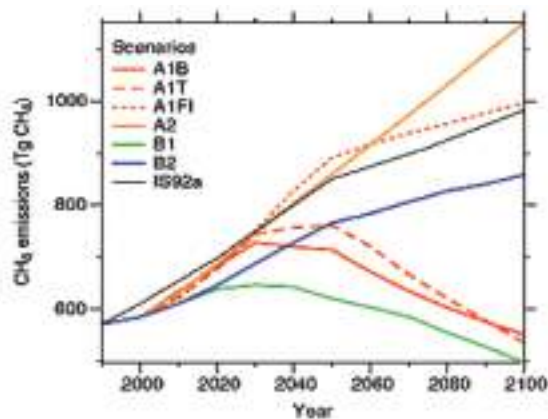


Рисунок 6.18. Глобальные антропогенные выбросы метана (Mт  $\text{CH}_4$ ) в 1990–2100, соответствующие сценариям SRES – Специального доклада МГЭИК о сценариях выбросов (IPCC, 2000)

На рис. 6.19 приведены соответствующие траектории концентраций  $\text{CH}_4$ . Заметим, что даже в рамках самого жесткого сценария A2 семейства SRES глобальная концентрация метана в конце XXI века (около 3750 ppb) будет превосходить современную (около 1800 ppb) *не более чем вдвое*.

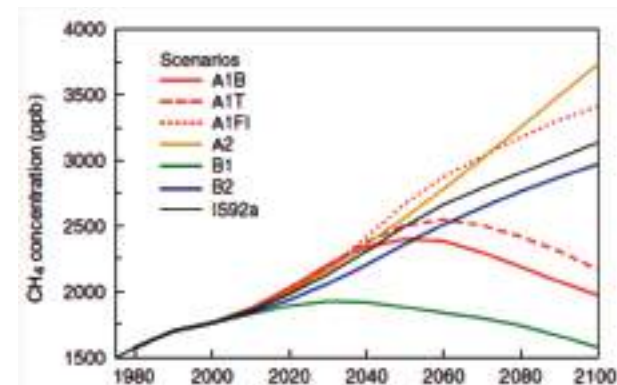


Рисунок 6.19. Ход глобальной концентрации  $\text{CH}_4$  (ppb) в XXI веке в условиях сценариев SRES и IS92a (IPCC, 2001a, p. 65)

В Пятом оценочном докладе МГЭИК, который вышел в 2013–2014 гг., были обобщены соответствующие оценки, сделанные в условиях сценариев семейства RCP. Результаты оценки глобальных антропогенных эмиссий, соответствующие этим сценариям, приведены на рис. 6.20, а соответствующий ход глобальных концентраций метана – на рис. 6.21.

Как видно из рис. 6.20, в условиях сценариев RCP глобальные антропогенные выбросы несколько более умеренные, чем при реализации более ранних сценариев. «Наилучший» сценарий RCP2.6 демонстрирует плавное снижение эмиссии метана на всем рассматриваемом периоде времени до примерно 150 Мт  $\text{CH}_4$  к 2100 году. «Наихудший» сценарий RCP8.5, напротив, предполагает рост выброса метана до уровня 900 Мт  $\text{CH}_4$  к концу столетия. Остальные два сценария семейства RCP (RCP4.5 и RCP6.0) дают промежуточные перспективные оценки. Тем не менее, они все же демонстрируют снижение глобальных антропогенных выбросов метана к 2100 году, хотя и более медленное, чем при «наилучшем» сценарии.

Ход глобальной концентрации метана, приведенный на рис. 6.21 для различных сценариев RCP, также предполагает более умеренный рост по сравнению со сценариями SRES (см. рис. 6.19). В условиях трех из четырех сценариев концентрация метана начинает убывать уже в XXI веке, не достигнув значений 2250 ppb.

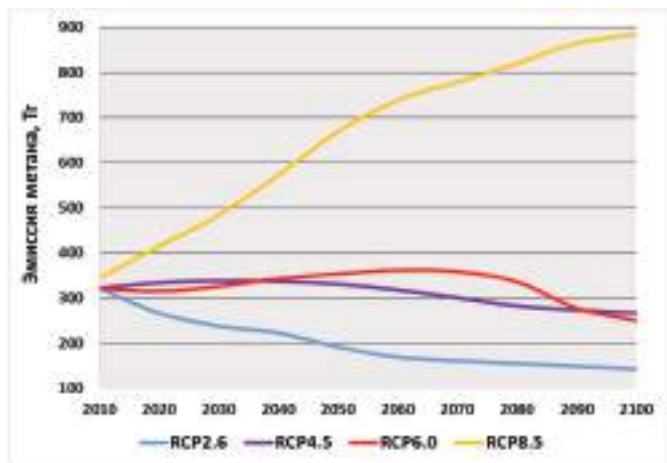


Рисунок 6.20. Глобальные антропогенные выбросы метана согласно различным сценариям семейства RCP. Составлено по данным работ (Kirtman et al, 2013; IPCC, 2013)

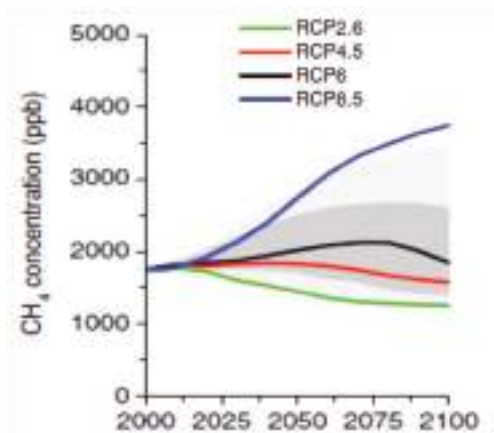


Рисунок 6.21. Ход глобальной концентрации  $CH_4$  (ppb) в XXI веке в условиях сценариев RCP (Clarke et al, 2010; van Vuuren et al, 2011)

На рис. 6.22 приведены перспективные оценки глобальных антропогенных выбросов метана в условиях нескольких сценариев всех трех семейств – IS92, SRES и RCP для иллюстрации степени их согласованности [53, 55].

Отметим также, что глобальный антропогенный выброс метана в условиях среднесрочного сценария BAU, разработанного Агентством по защите окружающей среды США (рассмотрен в начале этого раздела), на отметке 2030 года сопоставим со значениями в условиях «наихудших» долгосрочных сценариев разных семейств – IS92a, B1, RCP8.5 – и заметно превышает промежуточные варианты перспективных оценок для семейства сценариев RCP.

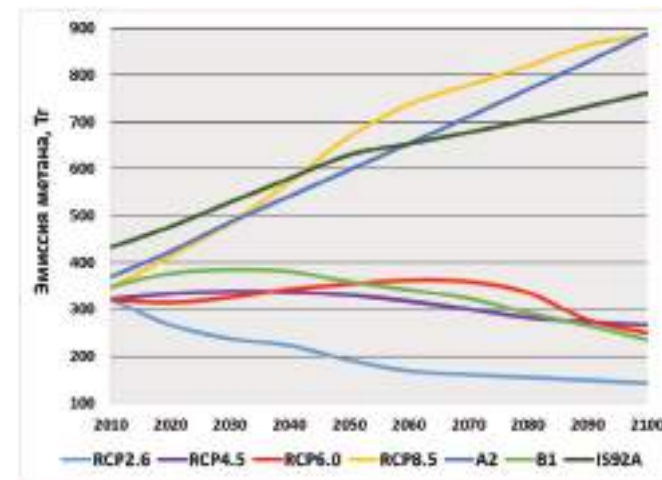


Рисунок 6.22. Сопоставление глобальных антропогенных выбросов метана в 2010-2100 гг. в условиях сценариев различных семейств; график составлен по данным (IPCC, 2013)

## 7.1. ПОТЕНЦИАЛ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

Для характеристики возмущения потоков энергии в системе «атмосфера+земная поверхность», в частности, вследствие изменения газового состава атмосферы, чаще всего используется понятие «радиационное воздействие» (radiative forcing – RF). Оно определяется следующим образом [64]: «радиационное воздействие на систему "тропосфера – земная поверхность" (вследствие, скажем, изменения концентрации какого-либо парникового газа) есть изменение нетто-потока ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) лучистой энергии на высоте тропопаузы после установления нового термодинамического равновесия в стратосфере, но при невозмущенном распределении температуры в подсистеме "тропосфера – земная поверхность"».

При этом имеется в виду, что термодинамическое равновесие в стратосфере устанавливается существенно быстрее, чем в системе «тропосфера – земная поверхность». Ведь в первом случае энергия распространяется очень быстро путем излучения, поглощения и переизлучения, а во втором случае в процесс передачи энергии вовлечены также довольно медленные механизмы – конвекция и адвекция в тропосфере и океане. В приведенном выше определении подразумеваются средние глобальные потоки энергии в вертикальном направлении.

При проведении модельных расчетов изменения средней глобальной приповерхностной температуры  $\Delta T$  в ответ на заданное радиационное воздействие  $\Delta F$  при помощи радиационно-конвективных моделей было обнаружено, что они примерно пропорциональны:

$$\Delta T = \lambda \Delta F,$$

причем коэффициент пропорциональности  $\lambda \approx 0,5 \text{ } ^\circ\text{К}/(\text{Вт м}^{-2})$  мало зависит от причины изменения  $\Delta F$  [69]. Этот коэффициент пропорциональности называется «чувствительностью климата» – «climate sensitivity». Именно в связи с этим понятие радиационного воздействия получило широкое распространение в прикладных исследованиях, связанных с вкладом различных атмосферных газов и других веществ в возможное антропогенное усиление парникового эффекта.

Для количественной характеристики способности какого-либо вещества производить радиационное воздействие на систему «тропосфера+земная поверхность» используется понятие потенциала глобального потепления (ПГП,

или global warming potential, GWP). Абсолютный потенциал глобального потепления (AGWP – Absolute Global Warming Potential) определяется как суммарное радиационное воздействие, которое за определенный промежуток времени TH (time horizon – временной горизонт) вызовет однократная эмиссия в атмосферу 1 кг данного вещества в начале этого промежутка времени:

$$AGWP = \int_0^{TH} aQ(t)dt.$$

Здесь  $t$  – время, прошедшее с момента эмиссии;  $Q(t)$  – количество данного вещества в атмосфере, еще остающееся к моменту  $t$ ;  $a$  – коэффициент пропорциональности («радиационная эффективность» – radiative efficiency,  $\text{Вт м}^{-2} \text{ кг}^{-1}$ ).

По смыслу этого определения абсолютный потенциал глобального потепления для заданного вещества зависит от его радиационной эффективности и скорости выведения из атмосферы (в случае кинетики 1-го порядка – от времени жизни в атмосфере).

Потенциал глобального потепления для какого-либо вещества (GWP) и временного горизонта определяется как отношение значений абсолютного потенциала глобального потепления данного вещества AGWP и некоторого эталонного (reference) вещества AGWP<sub>r</sub>:

$$GWP = \frac{AGWP}{AGWP_r}.$$

Таким образом, для эталонного вещества GWP = 1 при любом выборе временного горизонта для оценки воздействия. В качестве эталонного вещества принимается CO<sub>2</sub>. GWP – безразмерная величина.

Наиболее современные оценки времени жизни, радиационной эффективности и потенциалов глобального потепления для различных парниковых газов приведены в Пятом оценочном докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата [70]. В табл. 7.1 мы приводим часть этой информации для углекислого газа, метана и закиси азота. При этом потенциал глобального потепления дается для двух временных горизонтов – 20 и 100 лет.

Коэффициенты GWP<sup>25</sup> используются, в частности, для приведения выбросов остальных парниковых газов, кроме CO<sub>2</sub>, к выбросам CO<sub>2</sub>. Имея в виду эквивалентность возникающего радиационного воздействия, соответствующая единица измерения называется CO<sub>2</sub>-эквивалентом, CO<sub>2E</sub>. Например, (см. табл. 7.1) **1 Мт CH<sub>4</sub> = 28 Мт CO<sub>2E</sub>**. Эти значения показывают, что радиационные последствия выброса в атмосферу единицы массы (скажем, 1 т) CO<sub>2</sub>. В кадастрах для перевода метана в CO<sub>2</sub> – эквивалент применяют 25 – (имеет-

<sup>25</sup> По умолчанию используется временной горизонт 100 лет, если не оговорено иное.

ся в виду 25 Мт CO<sub>2E</sub>) согласно решению COP19 в Варшаве на основе пред- последнего доклада МГЭКИК (решения РКИК чуть отстают от рекомендаций МГЭИК).

Таблица 7.1

**Время жизни, радиационная эффективность и потенциал глобального потепления для углекислого газа, метана и закиси азота для временных горизонтов 20 и 100 лет (Myhre et al, 2013)**

Название	Химическая формула	Время жизни, годы	Радиационная эффективность, Вт м <sup>-2</sup> ppb <sup>-1</sup>	AGWP, (горизонт 20 лет) Вт м <sup>-2</sup> год кг <sup>-1</sup>	GWP (горизонт 20 лет)	AGWP, (горизонт 100 лет) Вт м <sup>-2</sup> год кг <sup>-1</sup>	GWP (горизонт 100 лет)
Углекислый газ	CO <sub>2</sub>	-	1,37 · 10 <sup>-05</sup>	2,49 · 10 <sup>-14</sup>	1	9,17 · 10 <sup>-14</sup>	1
Метан	CH <sub>4</sub>	12,4	3,63 · 10 <sup>-04</sup>	2,09 · 10 <sup>-12</sup>	84	2,61 · 10 <sup>-12</sup>	28
Закись азота	N <sub>2</sub> O	121	3,00 · 10 <sup>-03</sup>	6,58 · 10 <sup>-12</sup>	264	2,43 · 10 <sup>-11</sup>	265

## 7.2. ПОТЕНЦИАЛ ИЗМЕНЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

«Потенциал изменения глобальной температуры» (ПИГТ) – Global Temperature change Potential (GTP) – метрика, которая по своему замыслу призвана играть большую роль в прикладных оценках воздействий по сравнению с GWP [71].

«Абсолютный потенциал изменения глобальной температуры» – Absolute Global Temperature change Potential (AGTP) – есть «изменение средней глобальной температуры в заданный момент времени *t* в ответ на единовременный выброс единицы количества вещества в атмосферу в какой-либо момент времени *s*<sup>26</sup>».

Для каждого парникового вещества, как и в случае потенциала глобального потепления, рассматриваются две характеристики:

<sup>26</sup> Момент выброса *s* может предшествовать моменту *t*, для которого делается оценка, или же совпадать с ним

- «абсолютный потенциал изменения глобальной температуры» – Absolute Global Temperature change Potential (AGTP) – см. приведенное выше определение, и

- соответствующая относительная величина, «потенциал изменения глобальной температуры» – Global Temperature change Potential (GTP), которая является отношением AGTP для рассматриваемого вещества к его значению для эталонного вещества (reference matter), в качестве которого обычно используют углекислый газ:

$$GTP = AGTP / AGTP_r$$

В то время как AGWP (и GWP) оценивает последствие выброса единицы массы вещества в начальный момент некоторого промежутка времени [0, TH], исходя из интегрального для всего этого промежутка эффекта – возникающего радиационного воздействия, AGTP (и GTP) оценивает последствие только для температуры в конечный момент времени TH.

Как и для GWP, метрика GTP предназначена для получения оценок эмиссий различных парниковых газов в CO<sub>2</sub>-эквиваленте. Как и в случае GWP, соответствующие весовые коэффициенты существенно зависят от используемого временного горизонта – времени, прошедшего от момента выброса до момента, для которого оценивается эффект.

Впоследствии в работе [72] была предложена модификация концепции GTP, ориентированная на использование для оценки непрерывных эмиссий. В предположении о линейности, AGTP удобно использовать для оценки изменения глобальной температуры  $\Delta T(t)$  во времени при заданном сценарии глобальных эмиссий  $E_i(t)$  парниковых веществ:

$$\Delta T(t) = \sum_i \int_0^t E_i(s) AGTP_i(t - s) ds.$$

Здесь *i* – номер парникового вещества, *t* – текущий момент времени, *s* – момент эмиссии [73 – 75]. В табл. 7.2 приведены оценки потенциала изменения глобальной температуры для углекислого газа, метана и закиси азота для различных временных горизонтов.



Таблица 7.2

Потенциал изменения глобальной температуры для углекислого газа, метана и закиси азота для временных горизонтов 20, 50 и 100 лет (Myhre et al, 2013)

Название	Химическая формула	AGTP (горизонт 20 лет) К кг <sup>-1</sup>	GTP (горизонт 20 лет)	AGTP (горизонт 50 лет) К кг <sup>-1</sup>	GTP (горизонт 50 лет)	AGTP (горизонт 100 лет) К кг <sup>-1</sup>	GTP (горизонт 100 лет)
Углекислый газ	CO <sub>2</sub>	$6,84 \cdot 10^{-16}$	1	$6,17 \cdot 10^{-16}$	1	$5,47 \cdot 10^{-16}$	1
Метан	CH <sub>4</sub>	$4,62 \cdot 10^{-14}$	67	$8,69 \cdot 10^{-15}$	14	$2,34 \cdot 10^{-15}$	4
Закись азота	N <sub>2</sub> O	$1,89 \cdot 10^{-13}$	277	$1,74 \cdot 10^{-13}$	282	$1,28 \cdot 10^{-13}$	234

### 7.3. МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА, РАДИАЦИОННЫЙ ФОРСИНГ И ЕГО ИССЛЕДОВАНИЯ<sup>27</sup>

Самый продолжительный ряд наблюдений за атмосферной концентрацией метана, которые продолжаются и по настоящий день, принадлежит обсерватории Мауна Лоа на Гавайях. Наблюдения были начаты в начале 80-ых годов 20-ого века. С 1983 г. и по 2016 г. концентрация CH<sub>4</sub> выросла более чем на 240 млрд<sup>-1</sup> – с 1639,23 млрд<sup>-1</sup> до 1870,71 млрд<sup>-1</sup> (приведены средние значения для мая). Средний межгодовой темп роста концентрации составил 7,3 млрд<sup>-1</sup>. Данные наблюдения ведутся с помощью анализа проб воздуха, отобранных в специальные флаги, на газовом хроматографе. В настоящее время для измерения концентрации метана наряду с газовой хроматографией широко используются методы внутривибрационной лазерной спектроскопии.

Основными показателями, по которым оценивают динамику изменения концентрации метана в атмосфере, являются тренд и сезонный ход. Тренд отражает характер долгосрочных изменений и указывает на то, как быстро уменьшается или увеличивается концентрация. Сезонный ход, как следует из названия, демонстрирует изменение концентрации CH<sub>4</sub> вследствие смены

<sup>27</sup> Данная часть работы подготовлена специалистами ФГБУ «ГО им. А.И. Воейкова по Договорам ДП-МДК-2017/02, 2018/01, 2018/02 (И.Л. Кароль, В.М. Ивахов, А.А. Киселев)

сезонов года. В северном полушарии содержание метана в атмосфере достигает своего максимума в зимние месяцы, минимума – летом. В южном полушарии – наоборот. При этом амплитуда сезонного хода в Северном полушарии почти в два раза больше, чем в Южном.

На рис. 7.1 представлен временной ход концентрации метана для трех станций, расположенных в различных широтных поясах: Южный полюс, субэкваториальный пояс (станция Мауна Лоа) и Арктика (станция Алерт).

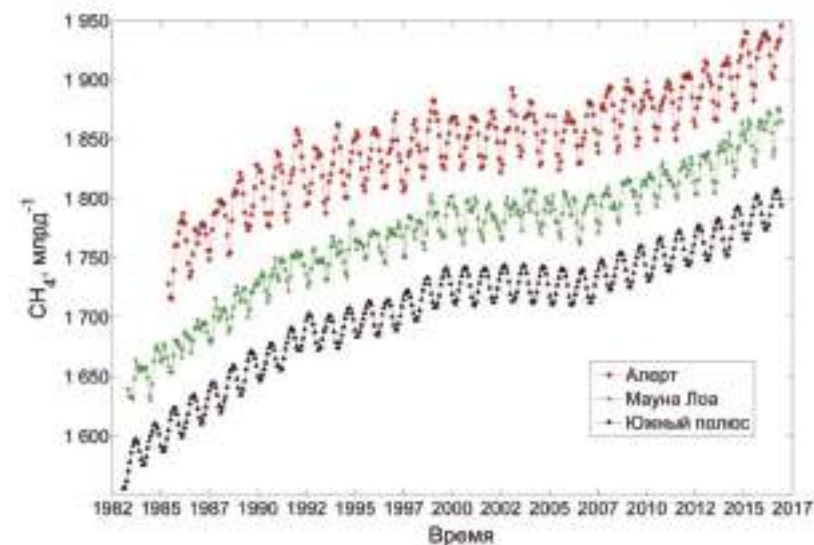


Рисунок 7.1. Временной ход атмосферной концентрации метана по данным станций, расположенных в различных широтных зонах (графики построены по данным из WDCGG (World Data Center for Greenhouse Gases) Всемирный Центр данных по парниковым газам)

Временной ход концентрации метана на Южном полюсе имеет ярко выраженный сезонный ход без каких-либо резких изменений, что обусловлено удаленностью источников метана и хорошо перемешанным воздухом. Продвигаясь от Южного полюса к Северному, общий уровень концентрации и амплитуда сезонного хода увеличиваются – сказывается близость континентальных естественных и антропогенных источников CH<sub>4</sub>.

На рисунке 7.2 представлена пространственно-временная динамика изменения концентрации метана для всего земного шара, полученная по данным наблюдений.



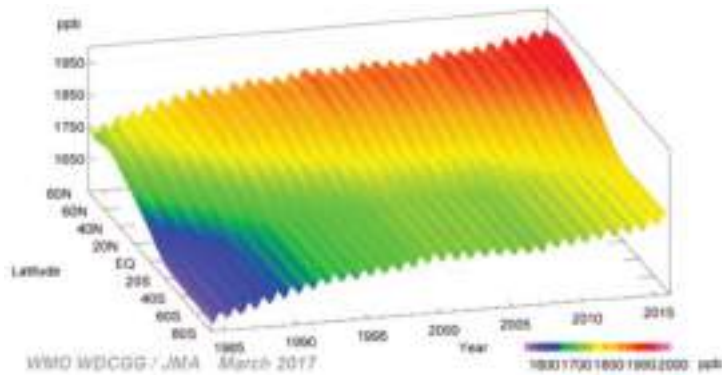


Рисунок 7.2. Временной ход атмосферной концентрации метана, построенный по среднемесячным данным наблюдений, для широтных зон в 20° (картинка взята с сайта WDCGG)

После того, как получены достоверные оценки выбросов метана, появляется основа для прогнозирования выбросов, которое является сложным процессом, требующим комплексного подхода с учетом многочисленных факторов: эффективность потребления энергоресурсов, влияние изменений климатической системы, прогнозы на потребление природного газа и других видов ископаемого топлива, появление новых технологий, ожидаемые результаты от принятых мер по снижению выбросов и др.

Для определения численных значений потенциала глобального потепления можно использовать другую метрику, а именно Радиационный Форсинг ( $RF$ ). Эта метрика может использоваться не только для оценки вкладов отдельных парниковых газов в глобальное потепление, но и в более широких пределах, например, с её помощью можно оценить воздействие на климат Земли крупного извержения вулкана или изменения потока солнечной радиации.

Согласно общепринятому определению, **Радиационный Форсинг**, определенный как разность балансов солнечной радиации с учетом  $F(t_1)$  или без учета  $F(t_2)$  каких-либо факторов:

$$RF = F(t_2) - F(t_1); \quad F = I^\uparrow(h) - I^\downarrow(h) + S^\uparrow(h) - S^\downarrow(h)$$

где  $I^\uparrow(h)$ ,  $I^\downarrow(h)$  – восходящий и нисходящий потоки ультрафиолетовой (солнечной) радиации,  $S^\uparrow(h)$ ,  $S^\downarrow(h)$  – восходящий и нисходящий потоки инфракрасной (длинноволновой) радиации,  $F$  – суммарный эффективный поток на уровне  $h$ . В качестве уровня  $h$  могут быть приняты либо верхняя граница атмосферы, либо земная поверхность, однако наиболее часто – это тропопауза (в том числе и далее в этом тексте). **Радиационный Форсинг представляет**

собой разность суммарных эффективных потоков в два момента времени  $t_1$  и  $t_2$ . При этом первый момент времени ( $t_1$ ) соответствует «невозмущённому» состоянию климатической системы, в том числе атмосферы, а второй ( $t_2$ ) – тому моменту, когда «возмущающее» событие (например, извержение вулкана или удвоение атмосферной концентрации  $CO_2$ ) уже состоялось. Другими словами, на уровне тропопаузы всегда существует некоторый баланс между приходящей и уходящей радиацией. **Радиационный Форсинг показывает, насколько изменится баланс при внесении «возмущения» по сравнению с «невозмущённым» состоянием климатической системы.** По существу, Радиационный Форсинг является аналогом широко используемой в математике частной производной.

Первоначально вычисление Радиационного Форсинга осуществлялось с помощью параметризационных формул (IPCC, 1990), в частности для  $CO_2$  и  $CH_4$ :

$$RF = 6,3 \ln (C/C_0);$$

$$RF = 0,036 (\sqrt{M} - \sqrt{M_0}) \times (f(M, N) - f(M_0, N_0)),$$

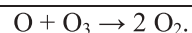
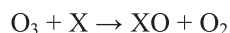
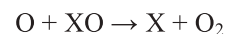
$$f(M, N) = 0,47 \ln [1 + 2,01 \times 10^{-5} (MN)^{0,75} + 5,31 \times 10^{-15} M (MN)^{1,52}].$$

где  $C$  – концентрация  $CO_2$  в  $млн^{-1}$ ,  $M$  и  $N$  – концентрации  $CH_4$  и  $N_2O$  в  $млрд^{-1}$  (ppbv, parts per billion by volume). Индекс «0» соответствует «невозмущённому» состоянию (моменту времени  $t_1$ ), а концентрации без индекса – моменту времени  $t_2$ . В последующем, с развитием сложных климатических моделей, включающих в себя как радиационные, так и химические блоки, расчёты Радиационного Форсинга производятся непосредственно, следуя вышеприведённому определению. Однако поскольку каждая такая модель имеет свои особенности (и свои недостатки), то при анализе полученных с их помощью результатов указывают как «наилучшее» значение, так и разброс значений по всему ансамблю использованных моделей.

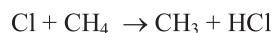
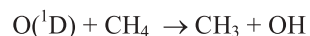
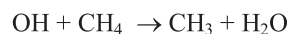
Говоря о современных значениях Радиационного Форсинга, обусловленного ростом содержания  $CO_2$  и  $CH_4$  в атмосфере, как правило, ссылаются на (IPCC, 2013): **1,66±0,17** и **0,48±0,05** Вт/м<sup>2</sup>, соответственно (в данном случае рассматривается **эффект от увеличения атмосферных концентраций углекислого газа и метана в период 1750-2011 гг.**). Но это лишь «верхушка айсберга». Дело в том, что приведённые выше величины отражают исключительно отклик радиационных потоков непосредственно на рост содержания  $CO_2$  и  $CH_4$  в атмосфере (так называемый *прямой* (Direct) Радиационный Форсинг). И если в случае с углекислым газом прямой Радиационный Форсинг в целом объективно отражает складывающуюся ситуацию (так как  $CO_2$  – фотохимически пассивен в атмосфере), то метан участвует в протекающих в атмосфере фотохимических процессах и тем самым влияет на то, каким будет содержание

других компонентов атмосферного воздуха (в том числе – парниковых газов). Наиболее существенно такое влияние на озон и водяной пар.

Как известно, разрушение озонового слоя происходит в каталитических циклах, в которых в качестве катализаторов X выступают гидроксил OH, окись азота NO, атомы Cl и брома Br, металлы и др. (под чертой указана сумма пары каталитических реакций):



Таким образом, концентрация озона, являющегося парниковым газом, напрямую зависит от содержания в атмосфере вышеперечисленных катализаторов. В свою очередь, некоторые из этих катализаторов реагируют с метаном:



В результате перечисленных реакций имеет место уменьшение их содержания в атмосфере, что сокращает озоноразрушающую способность соответствующего цикла и способствует сохранению озонового слоя.

**Одновременно, вследствие указанных реакций, происходит разрушение молекул метана, в конечном итоге приводящее в стратосфере к образованию молекул водяного пара,** который с учетом объема в атмосфере в основном и формирует общий парниковый эффект.

Это влияние может иметь двоякое значение. Во-первых, содержание метана снижается и, следовательно, снижается его прямой форсинг, но появляется **непрямой** форсинг, в основном через увеличение влияния паров воды. Но, как известно, концентрация H<sub>2</sub>O в атмосфере практически неизменна, следовательно, **непрямой форсинг CH<sub>4</sub>** не влияет на итоговую картину, то есть, увеличивая количество паров воды, разлагающийся CH<sub>4</sub> не ведет к увеличению влияния парниковых газов на климат.

Также можно указать на важность реакции метана с гидроксидом ввиду того, что чрезвычайно активный гидроксильный радикал является одним из главных «очистителей» атмосферы, во многом количественно определяющим газовый состав атмосферы. Как следствие, эволюция содержания метана в атмосфере сказывается и на прочих парниковых газах, хотя и в меньшей степени, чем на озоне и стратосферном водяном паре.

Нельзя считать вопрос оценки Радиационного Форсинга метана (и других парниковых газов) окончательно решенным. До сих пор появляются публикации, направленные на уточнение методов его расчёта. Например, недавно появилась статья за авторством одного из инициаторов введения этой метрики К. Шайна, в которой указывается на необходимость более аккуратного учёта поглощения коротковолновой радиации молекулами углекислого газа, метана и закиси азота, в том числе эффектов взаимного перекрытия полос поглощения этими газами [89]. По результатам их расчётов такой учёт приводит к увеличению величины Радиационного Форсинга метана примерно на 25%.

Таким образом, надо рассматривать вклад каждого парникового газа с учетом его влияния на остальные парниковые газы, не забывая при этом, что главный парниковый газ – H<sub>2</sub>O.

## 7.4. ВЛИЯНИЕ ОБЛАЧНОСТИ И АЭРОЗОЛЕЙ НА КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ

С учетом взаимодействия метана с другими веществами в атмосфере и участия в формировании водяного пара в стратосфере представляется целесообразным рассмотреть влияние паров воды и аэрозолей на радиационный форсинг. Данному вопросу посвящено много работ.

Рассмотрим некоторые из них [90,91]. **Пары воды и образуемая ими облачность** представляют серьезный фактор, влияющий на климат Земли. В работе [90], являющейся продолжением работ Гинзбурга [92,93], представлены результаты расчетов полусферических потоков отраженной и пропущенной атмосферой солнечной радиации и лучистого притока тепла на основе простых оптических моделей безоблачной и облачной атмосферы. Для решения задачи использован метод дельта-Эддингтона, который применим в широких пределах изменения оптической толщины атмосферы. В статье рассматриваются спектральные значения внеатмосферной радиации по нескольким литературным источникам. Расчет производился для значений альбедо 0, 0,5, 0,9 и для спектральных значений, соответствующих песчаной поверхности. Было рассмотрено 4 значения зенитного угла Солнца – 0°, 30°, 40° и 60°. При сравнении с экспериментальными данными использовались соответствующие экспериментальные значения угла Солнца. Полученные значения сравниваются с данными самолетных спектральных измерений полусферических потоков солнечной радиации и показывается, что примененные простые оптические модели приводят к реальным величинам характеристик радиации, а принятый метод расчета обеспечивает достаточную точность результата. Произведены оценки мгновенного локального радиационного форсинга атмосферных аэро-

золей и облака для трех моделей содержания аэрозолей и моделей облачного слоя, рассмотренных в (Гинзбург и др., 2016). Выполнен анализ зависимостей характеристик солнечной радиации от оптической толщины атмосферы для 4 значений зенитных углов Солнца, 2 значений альbedo подстилающей поверхности 0 и 0,9 и 2 значений вероятности выживания кванта 0,999 и 0,750. Получено, что указанные зависимости существенно различаются для рассмотренных моделей атмосферы, что наглядно характеризует влияние оптических параметров атмосферы и поверхности на трансформацию потоков солнечной радиации.

Сравнение модельных расчетов с самолетными измерениями полусферических потоков солнечной радиации [94] показывает хорошее соответствие для потоков и лучистых притоков в условиях безоблачной и облачной атмосферы, что дает возможность использовать простые модели однородной атмосферы для получения радиационных характеристик. Расчет Радиационного Форсинга в облачной атмосфере требует более сложных многослойных моделей, по крайней мере состоящих из 2-х слоев, что видно из различия и значений и знака результатов. Необходимо особенно подчеркнуть большое влияние процесса поглощения солнечной радиации в облачной атмосфере, в котором определяющую роль играют атмосферные аэрозоли, что необходимо аккуратно учитывать при моделировании. Модель двухслойной атмосферы с облаком дает положительный форсинг даже в отсутствие аэрозолей, объясняющийся газовым поглощением, которое сильнее при многократном рассеянии света в облаке. Отметим значение оптической толщины  $\tau = 4$ , которое является в некотором смысле пороговым: зависимости радиационных характеристик от оптической толщины резко меняются при переходе от менее оптически толстой атмосферы к более оптически толстой. Это связано с тем, что именно при этих значениях  $\tau$  резко возрастает роль многократного рассеяния в формировании поля радиации, что было показано в работе [95]. Полученные результаты демонстрируют, что использованные простые оптические модели обеспечивают адекватное рассмотрение влияния важнейших факторов на изменчивость солнечной радиации в атмосфере. Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (Соглашение № 14.586.21.0023, уникальный идентификатор проекта RFMEFI58615X0023) и с использованием оборудования Ресурсного центра «Обсерватория экологической безопасности» Научного парка СПбГУ.

Данные исследования подтверждают положение о том, что «главный парниковый газ – это пары воды». То, что их концентрация почти неизменна, объясняется только тем, что их оборот варьируется от 7 до 10 суток: возрастает

концентрация – выпадают осадки. Это естественный механизм регуляции климата.

Серьезное влияние на климат могут оказать аэрозоли, источником которых могут быть **вулканические извержения** [91].

Для надежной оценки возможных изменений климата Земли необходимо обеспечить достаточно точный учет в моделях климата основных факторов, определяющих радиационный теплообмен в атмосфере. В безоблачных условиях важной составляющей атмосферы, формирующей радиационный режим атмосферы наряду с поглощающими атмосферными газами, является аэрозоль. При учете аэрозольного ослабления в расчетах радиационных потоков в диапазоне длин волн солнечного излучения от 0.2 мкм до 5.0 мкм необходимо знать оптические параметры аэрозоля: оптическую толщину  $\tau$ , альbedo однократного рассеяния  $\omega_0$  и фактор асимметрии индикатрисы рассеяния  $g$ . Оптические параметры аэрозоля могут быть определены из непосредственных измерений спектральной прозрачности, а также восстановлены из радиационных измерений. Для количественной оценки воздействия аэрозоля на радиационный баланс на поверхности Земли и на верхней границе атмосферы используется величина, называемая аэрозольным радиационным форсингом (АРФ). Коротковолновый АРФ, который анализируется в настоящей работе, определяется как разность между балансом солнечной радиации, рассчитанным с учетом и без учета аэрозольного поглощения и рассеяния. Баланс определяется на каждом уровне атмосферы как разница между падающим и отраженным потоком.

Аэрозольная оптическая толщина является основным параметром, определяющим степень аэрозольного влияния на потоки солнечного излучения. Для количественной оценки замутненности атмосферы аэрозольными частицами традиционно используется оптическая толщина аэрозоля на длине волны 550 нм, которая при отсутствии данных измерений спектральной прозрачности может быть восстановлена по актинометрическим измерениям интегральных потоков солнечного излучения. Знание одного этого параметра недостаточно для определения влияния тропосферного аэрозоля на приземную температуру воздуха и климат [97-100]. В зависимости от величины альbedo однократного рассеяния аэрозольные частицы могут нагревать или выхолаживать поверхность Земли.

С созданием приборов, предназначенных для радиационных измерений в нескольких узких интервалах солнечного спектра, появилась возможность определения всех трех аэрозольных оптических параметров на нескольких длинах волн. Так методика, используемая на сети солнечных фотометров AERONET, позволяет восстановить указанные параметры на четырех длинах волн 440, 670, 870 и 1020 нм. Сеть AERONET включает несколько сотен стан-

ций, расположенных в разных регионах земного шара. Заметим, что из спутниковых измерений обычно восстанавливают только оптическую толщину на 550 нм, и ее восстановление ограничено большими погрешностями, связанными с влиянием облачности и подстилающей поверхности. Для определения остальных параметров все еще необходимы данные наземных измерений и модельных расчетов.

В работе [91] приведены данные комплексных систематических измерений в безоблачных условиях на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы имени А.М. Обухова Российской академии наук (ЗНС ИФА РАН) (55°42' N, 36°46' E), полученные весной-летом 2004 г. и в летний сезон 2005 г., используются для определения величин коротковолнового радиационного форсинга фонового аэрозоля. Фоновый аэрозоль на ЗНС характеризуется оптической толщиной 0.04-0.30 на длине волны солнечного излучения 550 нм. Он существенно слабее влияет на потоки солнечного излучения, чем, например, дымовой аэрозоль, радиационные свойства которого были исследованы. Тем не менее, изучение фонового аэрозоля представляет важный научный интерес, так как из-за постоянного присутствия в тропосфере он оказывает заметное влияние на радиационный баланс атмосферы и поверхности.

В итоге в этой работе [91] проведены расчеты потока солнечного излучения на поверхности и аэрозольного радиационного форсинга для безоблачных периодов наблюдений на ЗНС летом 2004, 2005 гг. Было использовано пять моделей оптических параметров аэрозоля: стандартная модель континентального аэрозоля, полуэмпирическая модель, полученная по данным измерений, и три модели, полученные из расчетов по теории рассеяния Ми для среднего распределения аэрозольных частиц по размерам, восстановленного из ореольных измерений. Исследование чувствительности потока и форсинга к выбору модели аэрозоля показало, что относительная погрешность, связанная с выбором модели, невелика в падающем потоке (<5%) и достигает 120% в аэрозольном форсинге на верхней границе атмосферы. Величина аэрозольного радиационного форсинга на верхней границе атмосферы по результатам наших расчетов изменяется в диапазоне от -15 до -2 Вт/м<sup>2</sup>. Наличие данных о значениях альbedo однократного рассеяния и фактора асимметрии индикатрисы рассеяния на длине волны 550 нм для каждого периода наблюдений и учет этих параметров в радиационных расчетах позволяет существенно уточнить величину аэрозольного радиационного форсинга по сравнению с использованием в расчетах средних значений этих параметров за все периоды. Еще более точное определение величины аэрозольного радиационного форсинга возможно только при наличии данных о распределении аэрозольных частиц по размерам и их химическом составе для конкретной анализируемой

ситуации. В результате проведенного исследования чувствительности для использования в радиационных расчетах предлагаются две модели оптических параметров фонового аэрозоля: полуэмпирическая модель и средняя модель, полученная из расчетов по теории рассеяния. Обе модели используют значения альbedo однократного рассеяния и фактора асимметрии на длине волны 550 нм, восстановленные из измерений для каждого периода наблюдения.

Указанные исследования подтверждают, что извержения вулканов с древних времен и до наших дней оказывают существенное влияние на климат и жизнь людей на Земле.

Происшедшее в 2010 году извержение вулкана Эйяфьядлайёкюдль в Исландии – на несколько дней прервано авиасообщение в Европе, хотя выброс был всего 0,01 км<sup>3</sup>.

Для сравнения:

- извержение вулкана Кракатау в Индонезии – 20 км<sup>3</sup> (1883 г.),
  - извержение вулкана Тамбора в Индонезии – 150 км<sup>3</sup> (1815 г.) – крупнейшее извержение в истории человеческой цивилизации, существенно изменившее климат на планете: в Германии и Канаде летом 1816 года лежал снег, тысячи людей умерли от голода и эпидемий.
  - извержение вулкана Уайнапутина в Перу – 30 км<sup>3</sup> (1600 г.) – привело к похолоданию и неурожаям в Северной Европе, что, вполне вероятно, способствовало наступлению Смутного времени в России.
- Тысячелетия назад были четыре грандиозных извержения:
- вулкан Таупо в Новой Зеландии – 1170 км<sup>3</sup> (26,5 тыс. лет назад) – совпало с началом похолодания, продолжавшегося около 2 000 лет. Связь между этими событиями пока не доказана.
  - вулкан Тоба в Индонезии – 2800 км<sup>3</sup> (74 тыс. лет назад) – крупнейшее извержение за последние несколько миллионов лет. Массовое вымирание животных и растений по всему миру из-за изменения климата.
  - вулкан Йеллоустоун, США – 1000 км<sup>3</sup> (640 тыс. лет назад) – последнее суперизвержение в Йеллоустонской кальдере.
  - вулкан Сибирские траппы – 5 млн км<sup>3</sup> (250 млн. лет назад) – образовались в результате выхода на поверхность суперплюма. Выбросы лавы и пепла покрыли площадь 2-7 млн км<sup>2</sup>. Извержение продолжалось миллион лет: было уничтожено около 90% жизни на Земле.



Средняя глобальная концентрация метана в приповерхностном слое атмосферы в 1750 г. оценивается как  $722 \pm 25$  ppb [26, 76], а в 2011 г. она достигла  $1803 \pm 2$  ppb [77].

За период 1750-2011 гг. радиационное воздействие метана составило  $0,48 \pm 0,05$  Вт м<sup>-2</sup>, а совокупное радиационное воздействие всех хорошо перемешиваемых газов (well-mixing gases) составило  $2,83$  [2,54 – 3,12] Вт м<sup>-2</sup>. [70].

Таким образом, к настоящему времени на долю метана приходится примерно 17% суммарного радиационного воздействия, связанного с антропогенным увеличением содержания хорошо перемешанных парниковых газов в атмосфере. На рис. 8.1 представлены значения радиационного воздействия CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O и других хорошо перемешиваемых парниковых газов в 1850-2011 гг. В настоящее время метан является вторым после CO<sub>2</sub> в ряду по значению радиационного воздействия<sup>28</sup>.

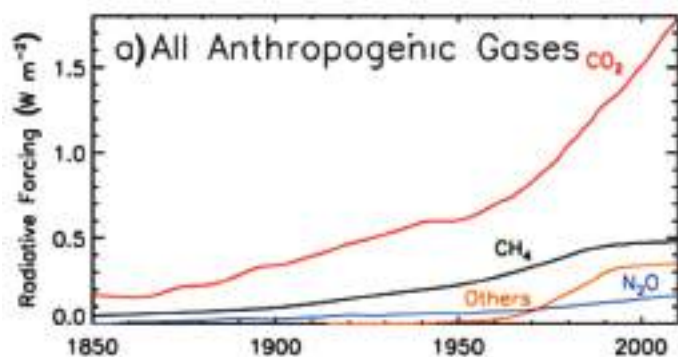


Рисунок 8.1. Радиационное воздействие углекислого газа, метана, закиси азота и других хорошо перемешиваемых газов в 1850-2011 гг. (Myhre et al, 2013, p. 677)

На рис. 8.2 представлено радиационное воздействие в XXI веке, связанное с антропогенными эмиссиями углекислого газа, метана, закиси азота, озона, других парниковых газов и аэрозолей с начала индустриальной эры [78]. Расчеты выполнены в условиях четырех сценариев RCP для 2100 г. и для 2010 г. На верхней панели – абсолютные значения, на нижней – относительные, в процентах от суммарного радиационного воздействия.

<sup>28</sup> Без учета влияния паров воды (Ред.)

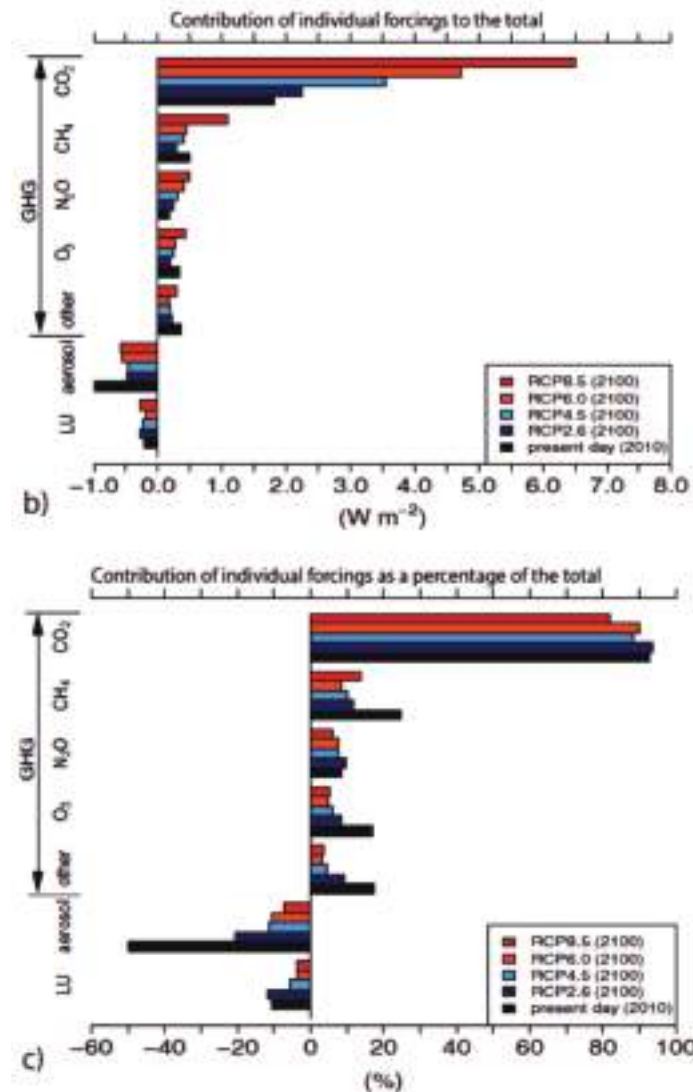


Рисунок 8.2. Вклады различных парниковых веществ – CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, других парниковых газов и аэрозолей – в суммарное радиационное воздействие (с начала индустриальной эры) в 2100 г. в условиях четырех сценариев RCP и в 2010 г.: верхняя панель – абсолютные величины, нижняя панель – % (Meinshausen, 2011; Collins et al, 2013, p. 1046)



Заметим, что современный вклад метана оценивается примерно в 23%, что несколько выше приведенной выше оценки в 17%. Однако это объясняется, в том числе, разными базовыми цифрами – в приведенной выше оценке базовая цифра не включала аэрозоли, которые оказывают охлаждающий эффект.

Во всяком случае, оценки для 2100 г. показывают, что в относительных единицах роль метана в будущем не возрастает, а остается примерно на уровне начала XXI века или несколько меньше.

Для приблизительной оценки вклада  $CH_4$  в увеличение глобальной температуры в XXI веке можно воспользоваться примерной пропорциональностью этого увеличения и радиационного воздействия.

В заключение этого раздела приведем данные об изменениях средней температуры в приповерхностном слое (см. табл. 8.1), ожидаемые в условиях различных сценариев RCP. Считая изменение температуры пропорциональными радиационному воздействию ( $\Delta T = \lambda \Delta F$ , см. раздел 7.1), а также принимая во внимание оценки вклада метана в радиационное воздействие в конце XXI в условиях сценариев RCP, можно заключить, что вклад метана в изменение глобальной температуры будет в пределах  $1^\circ C^{29}$ .

<sup>29</sup> Оценка С.М. Семенова, И.Л. Говор, Н.Г. Уваровой для НИИПЭ по контракту ДП-МДК-2017-01 от 18.05.2017. (Ред.)

Таблица 8.1

Аномалия  $\Delta T$  средней температуры ( $^\circ C$ ) по отношению к среднему уровню 1986–2005 гг. в условиях сценариев RCP – глобально и для некоторых областей географического пространства (Collins et al, 2013, p. 1055). Приводится межмодельное стандартное отклонение  $\sigma$  и в скобках – интервал, соответствующий 90%-му доверительному интервалу (5%, 95%) для нормального распределения

Регион	Сценарий			
	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
Глобально: 2046–2065	1,0 ± 0,3 [0,4, 1,6]	1,4 ± 0,3 [0,9, 2,0]	1,3 ± 0,3 [0,8, 1,8]	2,0 ± 0,4 [1,4, 2,6]
2081–2100	1,0 ± 0,4 [0,3, 1,7]	1,8 ± 0,5 [1,1, 2,6]	2,2 ± 0,5 [1,4, 3,1]	3,7 ± 0,7 [2,6, 4,8]
Суша: 2081–2100	1,2 ± 0,6 [0,3, 2,2]	2,4 ± 0,6 [1,3, 3,4]	3,0 ± 0,7 [1,8, 4,1]	4,8 ± 0,9 [3,4, 6,2]
Океан: 2081–2100	0,8 ± 0,4 [0,2, 1,4]	1,5 ± 0,4 [0,9, 2,2]	1,9 ± 0,4 [1,1, 2,6]	3,1 ± 0,6 [2,1, 4,0]
Тропики: 2081–2100	0,9 ± 0,3 [0,3, 1,4]	1,6 ± 0,4 [0,9, 2,3]	2,0 ± 0,4 [1,3, 2,7]	3,3 ± 0,6 [2,2, 4,4]
Арктика: 2081–2100	2,2 ± 1,7 [-0,5, 5,0]	4,2 ± 1,6 [1,6, 6,9]	5,2 ± 1,9 [2,1, 8,3]	8,3 ± 1,9 [5,2, 11,4]

Несмотря на создающееся глобальными СМИ впечатление о наличии в мировом научном сообществе широкого консенсуса по поводу наличия на Земле глобального потепления, причем – антропогенного характера, анализ существующих взглядов ученых различных стран показывает серьезный разброс позиций по этому вопросу. Связано это, прежде всего, с сохранившейся в ряде научных школ объективностью, требующей осознания любой проблемы во всей ее сложности; при этом сложность проблемы глобального климата справедливо оценивается как сверхвысокая. По мнению многих ученых, человечество на сегодняшний день не располагает адекватным проблеме научным аппаратом, позволяющим сколько-нибудь корректно прогнозировать глобальный климат; те же модели, которые для этого используются, характеризуются как упрощенческие или даже подгоняющие задачу под ответ. Разрекламированный «консенсус» по поводу потепления и его причин определяется сторонниками альтернативных точек зрения как «насильственный», а освещение проблемы в СМИ – как однобокое [96 – 121].

Разброс мнений в мировом научном сообществе касается следующих вопросов тренда изменения климата, который некоторыми учеными характеризуется не как потепление, а как похолодание.

В частности, это связывается с падающей солнечной активностью. Вот мнение Валентины Жарковой, профессора Британского университета Нортумбрии: «Солнечная активность сейчас в большом минимуме, и магнитное поле Солнца очень сильно уменьшается. Это значит, что космические лучи разрушают наши облака в тропосфере, открывают атмосферу и делают температуру более холодной. Кроме снегов в Северной Америке и Европе появляются очень необычные северные сияния – совершенно необычного цвета. Это говорит, что частицы идут не от солнца, а от космических лучей. В этой связи мы считаем, что это начало глобального солнечного минимума, который будет длиться 30 лет».

К таким же неутешительным выводам о новом ледниковом периоде приходит и ведущий научный сотрудник Института физики Земли РАН Елена Попова: «В целом солнечная активность представляет собой регулярный циклический процесс. И каждые 11 лет количество пятен увеличивается, а потом опять спадает. Наши расчеты показали, что следующие три цикла солнечной активности будут по амплитуде ниже по сравнению с предыдущими. Если взять схематичный график, то следующий цикл будет ниже. То есть у него будет амплитуда ниже, потом еще ниже, ну а потом солнечная активность будет восстанавливаться» [96].

<sup>30</sup> Работа выполнена С.А. Рогинко для НИИПЭ по Контракту ДП-МДК-2018/04 от 10.04.2018 г.

В истории уже бывали периоды низкой солнечной активности. Самый известный – Минимум Маундера (Maunder Minimum), который начался в 1645-м и длился больше полувека. По Темзе и Дунаю катались на санках, а замерзшая Москва-река по полгода служила площадкой для ярмарок. Явление было обнаружено английским астрономом Эдвардом Уолтером Маундером (1851–1928), обнаружившим его при изучении архивов наблюдения Солнца. По подсчётам Маундера, за этот период наблюдалось всего около 50 солнечных пятен вместо обычных 40-50 тысяч.

Результаты Маундера были позже подтверждены анализом содержания углерода-14, а также некоторых других изотопов, например, бериллия-10, в ледниках и деревьях. Такой анализ позволил выявить 18 минимумов активности Солнца за последние 8000 лет, включая минимум Шпёрера (1450–1540) и минимум Дальтона (1790–1820). Также, по некоторым данным, во время Маундеровского минимума наблюдалось падение интенсивности полярных сияний и скорости вращения Солнца [97].

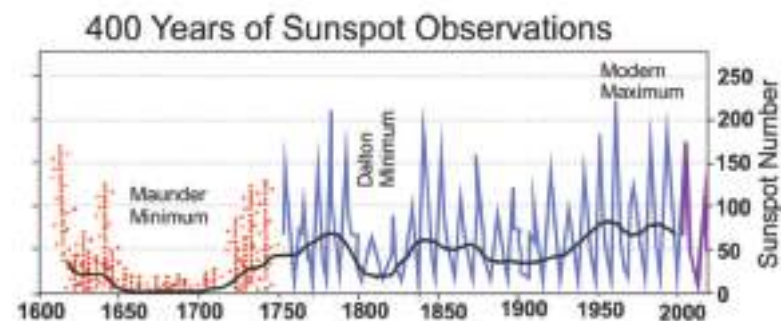


Рисунок 9.1. Солнечная активность в период «Минимума Маундера».  
Источник: 2 ([https://ru.wikipedia.org/wiki/Минимум\\_Маундера](https://ru.wikipedia.org/wiki/Минимум_Маундера))

Минимум Маундера совпадает по времени с наиболее холодной фазой глобального похолодания климата, отмечавшегося в течение XIV–XIX веков (так называемый малый ледниковый период).

Правда, период, который был во время Минимума Маундера, был намного дольше, он длился шесть солнечных циклов. Следующий, современный, который ожидается, будет намного короче – всего три цикла. И в этой связи прогнозируются не такие масштабные катаклизмы как в 17 веке, но понижение температуры, разумеется, будет.

Более пессимистический прогноз отношении вероятных последствий нового «Малого Ледникового Периода» дает американский климатолог Джон

Л. Кейси, сотрудник НАСА. Он и несколько его коллег представили доклад главам ведущих мировых правительств и ООН, в котором прямо заявили: человечество в опасности. По мнению Кейси, в ближайшее время нас ждут темные и холодные дни и ночи и, как следствие, гибель урожая и массовый голод. Подтверждением радикальных сдвигов в климате, по мнению Кейси, являются те самые нынешние погодные аномалии, которые многими политиками и экспертами выдаются за последствия глобального потепления. Все эти последствия станут ощутимыми уже в ближайшие 30 лет [96].

Одним из подтверждений этой гипотезы стали опубликованные в январе 2018 г. данные о состоянии вечной мерзлоты в Гренландии, опровергающие широко разрекламированные утверждения сторонников теории потепления о «тающей Гренландии». По данным группы ученых во главе с профессором Бо Элберлингом, руководителем Центра исследований вечной мерзлоты Копенгагенского университета, за последние 15 лет температура областей вечной мерзлоты в Гренландии не повысилась, а даже резко снизилась. Бо Элберлинг справедливо заявляет, что на 15-летнем горизонте можно просматривать только погодные изменения, но не климатические, но даже эти данные серьезно противоречат пропагандистским материалам, пугающим человечество повышением температуры каждый год [98].

### ПРИРОДА КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ, В КОТОРОЙ ПРЕОБЛАДАЮТ ПРЕЖДЕ ВСЕГО ПРИРОДНЫЕ ЦИКЛИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ.

Одним из подобных факторов считается явление прецессии (движение по кругу оси Земли относительно наклона к Солнцу), открытое ещё более двух тысяч лет назад астрономами древнего Египта.

Земля во вращении вокруг своей оси замедляет своё движение (замедление – величина переменная и составляет за тысячу лет примерно 0,1-1 секунду). Земля при затухающем вращении раскачивается как юла, подставляя к Солнцу то одну, то другую зону. Именно поэтому древние греки словом «климат» называли «наклон» лучей Солнца к поверхности Земли [99].

В прецессии Земли один полный оборот оси планеты по кругу (360 градусов) происходит за 25920 лет (за 72 года на 1 градус). Угол отклонения оси Земли (от условного центра) при раскачивании планеты составляет 23 градуса 27 минут. По глобусу, это расстояние от Швеции до Кипра. Угол между максимальным и минимальным наклоном Земли к Солнцу в прецессии в два раза больше и составляет уже 46 градусов и 54 минуты. Это примерно равно расстоянию от Полярного круга до Африки. Тем самым, когда Земля подставит под лучи Солнца не побережье Африки (как сейчас), а под тем же углом наклона –

северные берега Скандинавии, в странах Скандинавии будет такая же жара, как в центральной Африке.

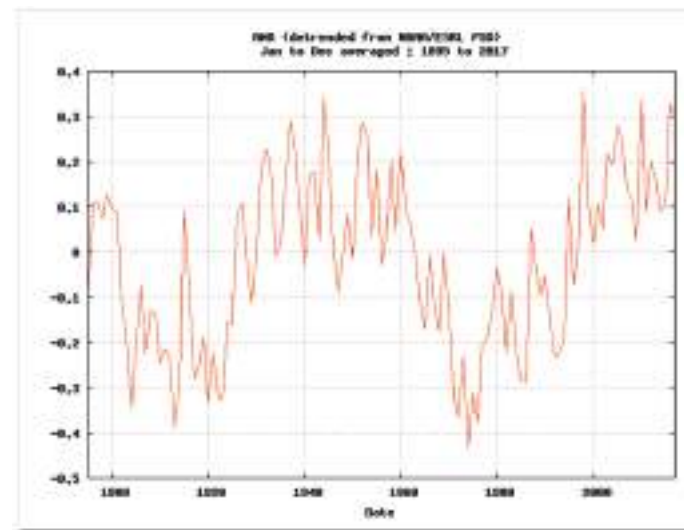


Рисунок 9.2. График температурных изменений в вечномерзлотных областях Гренландии (1900 – 2017 гг.). Источник: [99] (<http://scienordic.com/greenland%E2%80%99s-recent-temperature-drop-does-not-disprove-global-warming>)

Древние египтяне и греки называли полный круг 25920 лет прецессионного оборота и раскачивания планеты – большим годом Земли («Платоновский год»), со всеми его глобальными изменениями климата. Таким образом, прецессия на смену климата на Земле оказывает единственно важное, глобальное и цикличное влияние.

Знания по геологии говорят, что ледниковые периоды на Земле повторялись многократно, а последний ледниковый период закончился около 10 - 12 тысяч лет назад. В те годы ледяной панцирь в Северном полушарии порой опускался до широты современных городов Киева, Берлина и Лондона. Скандинавия, Балтика, Канада и Сибирь были под многометровым слоем льда и снега. Местами лед был такой, как сегодня в Антарктиде. За счет того, что огромная масса земной воды была сконцентрирована во льдах на северных материках, покрывая большое пространство Евразии и Америки, уровень мирового океана был ниже современного на 100-200 метров.

Попытки спрогнозировать будущие климатические изменения на основе этого тренда позволяют считать, что при прецессионном движении нашей

планеты пик жары в Северном полушарии ещё не пройден. Пик жары может ожидаться через 1000-3000 лет. А до той поры возможны различные сочетания похолодания и потепления. По мнению академика РАН, научного руководителя кафедры криософии Тюменского государственного университета Владимира Мельникова, Земля сейчас переживает некий переходный период от одного состояния к другому. Мы доживаем межледниковье, прожив уже около 10 тысяч лет, и остается около 1 тысячи лет до нового ледникового периода, то есть планета приближается к похолоданию.

С этим мнением отчасти согласен академик Виктор Осипов, научный руководитель Института геоэкологии РАН. По его мнению, судить об изменении климата можно только по трендам. «И сейчас тренд — голоценовый (голоцен — эпоха четвертичного периода, сменяющая плейстоцен и делящая последние 12 тысяч лет вплоть до современности), который развивается в течение последних 8000 лет — это тренд на понижение температуры Земли, — отметил академик, — но на фоне тренда понижения за последние 150 лет мы имеем быстрое повышение температуры — 0,02 градуса за десять лет. Такого еще не было. Есть предположение, что это связано с техногенезом и воздействием человека на климатическую систему. Поэтому сейчас температура повышается, но многовековой тренд на похолодание сохраняется» [103].

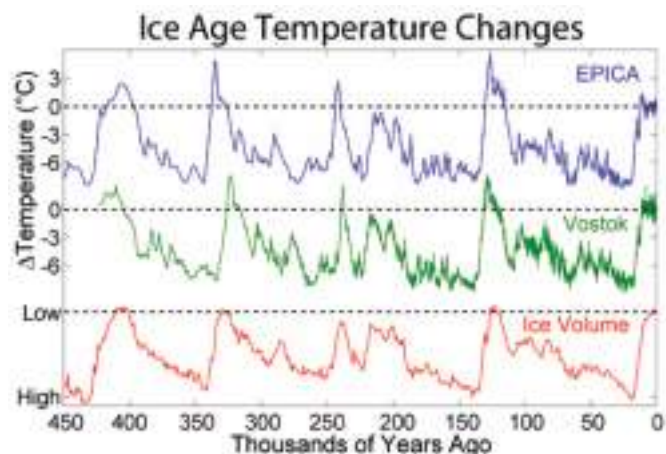


Рисунок 9.3. Температурные циклы на протяжении последних 450 тыс. лет (по данным анализа льда антарктических экспедиций). Источник: [102]

Одной из новых гипотез по климатическим трендам является гипотеза глобального затемнения, обнаруженная в 1985 году ученым Ацуму Омурой из Швейцарского Федерального Института Технологии. Это явление, кото-

рое Омуро обнаружил в ходе своих исследований, сводится к уменьшению с каждым десятилетием уровня солнечного света. Согласно результатам его исследований, уровень солнечного света, падающий на земную поверхность в течение последних трех десятилетий сократился более чем на 10%. Исследования были продолжены другими специалистами, и в настоящее время в научной литературе представлены несколько других научных работ, опубликованных по этому вопросу, и все они обнаружили, что уровень света значительно снижается. Уменьшение уровня солнечного света отмечено в Ирландии, в Арктике, и Антарктике, и в Японии.

Королевский метеорологический институт Бельгии объявил декабрь 2017 года «самым темным месяцем с 1887 года», когда начались наблюдения. За этот месяц, на метеорологической станции г. Уклле было зафиксировано всего 10,5 часов, когда можно было увидеть Солнце.

В северной части Франции, в декабре 2017 г. было отмечено всего 26 часов солнечного света, а в январе 2018 г. — еще меньше. Французская метеослужба (Météo France) зарегистрировала лишь 2,7 часа солнечного сияния с 1 по 13 января в г. Лилле, крупнейшем городе региона, что синоптики считают аномалией и зафиксировали как «исключительный случай», поскольку средний показатель за январь для этого города составляет 61,4 часа.

Затемнение стало признаваться глобальной проблемой с 2001 года, когда израильский ученый Шабтай Коган и его коллеги из Вулканического центра в Бет Дагане собрали все имеющиеся доказательства вместе и сделали заключения, подтверждающие справедливость этой гипотезы [104].

Обобщенная форма взаимосвязи между климатом и солнечной радиацией была впервые сформулирована в т.н. циклах Миланковича (названы в честь сербского астрофизика Милутина Миланковича). Циклы Миланковича отражают колебания достигающего Земли количества солнечного света и солнечной радиации на протяжении больших промежутков времени. В значительной мере циклы Миланковича объясняют происходящие на Земле естественные изменения климата и играют большую роль в климатологии и палеоклиматологии, главным образом в изучении проблематики глобального потепления и парникового эффекта. Тем не менее, из-за сложных процессов взаимодействия разных факторов, а также обратной связи, полное отождествление перемен климата с колебаниями получаемого Землей количества солнечной энергии неоправданно и не может служить достаточно точной моделью для реконструкции климатических процессов прошлого и будущего.

Циклы Миланковича описывают периодически возникающие отклонения инсоляции полушарий от средней за большой период времени в пределах от 5 до 10 процентов. Причиной этих отклонений от средней интенсивности солнечного излучения на Земле являются следующие эффекты:



- Лунно-солнечная прецессия (упоминавшаяся выше): поворот земной оси с периодом около 25 920 лет, в результате которого меняется сезонная амплитуда интенсивности солнечного потока на северном и южном полушариях Земли;
- Долгопериодические (так называемые вековые) колебания угла наклона земной оси к плоскости её орбиты с периодом около 41 000 лет, вызванные возмущающим действием других планет;
- Долгопериодические колебания эксцентриситета орбиты Земли с периодом около 93 000 лет.
- Перемещение перигелия орбиты Земли и восходящего узла орбиты с периодом соответственно 10 и 26 тысяч лет [105].
- Поскольку описанные эффекты являются периодическими с некрратным периодом, регулярно возникают достаточно продолжительные эпохи, когда они оказывают кумулятивное влияние, усиливая друг друга. Циклы Миланковича обычно используются для объяснения климатического оптимума голоцена (климатический оптимум голоцена продолжался примерно с 9000 до 5000 лет до н. э. В течение этого периода температура была существенно выше современной).

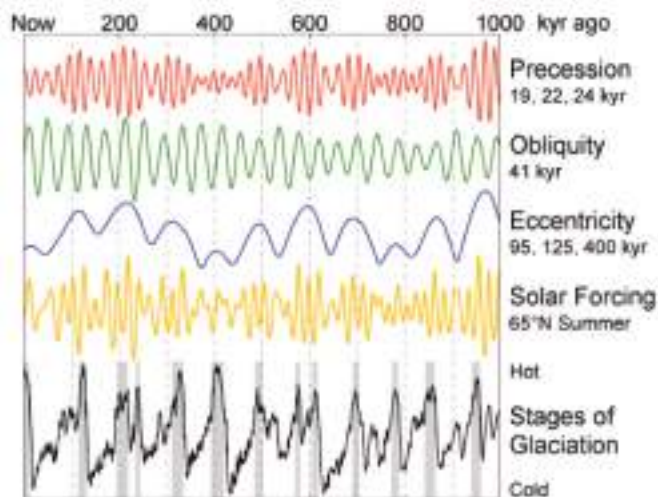


Рисунок 9.4. Составляющие эффекты циклов Миланковича по времени. Источник: [106]

Еще один вид природных циклических колебаний, по мнению ученых, влияющих на климат, называется осцилляциями Дансгора — Эшгера. Речь

идет о резких изменениях климата во время последнего ледникового периода, которых насчитывается 23, по материалам гренландских кернов. Название образовано от имён учёных, которые первыми начали использовать ледовые керны для изучения палеоклимата и заметили следы резких изменений температуры в них.

В северном полушарии осцилляции Дансгора — Эшгера проявляются в виде быстрого (в пределах десятилетий) потепления с последующим постепенным похолоданием (на протяжении веков). Разница температур во время осцилляции в Гренландии достигала 15 градусов Цельсия (по другим источникам 7-8 градусов). В южном полушарии потепление происходит медленнее и размах колебаний менее значителен. Хотя вариации температур в Гренландии и Антарктике существенно различаются, наблюдается корреляция между временами резкого изменения температуры в Гренландии и градиента температуры в Антарктике: изменение в Гренландии обычно происходило в конце плавного изменения температуры в Антарктике.

Осцилляции Дансгора — Эшгера подчиняются 1470-летнему циклу, который в свою очередь складывается из циклов продолжительностью 87 и 210 лет. Новейшие материалы ледяных кернов за последние 50 тыс. лет показывают отклонения около 12 % (2 % для пяти последних осцилляций). В то же время осцилляции в более древних частях керна не обнаруживают строгой цикличности.

Похожие 1500-летние колебания климата во время голоцена называются циклами Бонда [107].

### КОРРЕКТНОСТИ ОПИСАНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ, МЕТОДОЛОГИИ КЛИМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И СОСТАВА ПЕРВИЧНЫХ ДАННЫХ.

Темой острой климатической полемики стал т.н. Средневековый климатический оптимум, вызвавший в 9 – 15 вв. во всей Европе заметный рост населения и сельскохозяйственной продукции, за счёт расширения земледельческих угодий и более высокого качества урожаев. Теплый (по сравнению с нынешним) климат способствовал экспансии растущих земледельческих народов в периферийные, мало освоенные регионы, такие как север Норвегии (где урожаи зерновых выращивались на широтах вплоть до полярного круга). Теплый климат позволил викингам на постоянной основе заселить Исландию (870 год) и Гренландию (с 986 года; в XV веке поселения были покинуты). В летописях упоминается о виноделии в Восточной Пруссии, Померании и даже на юге Шотландии в этот период.

Однако, политизация проблемы климата вынудила руководителей МГЭИК перейти в конце 1990-х гг. от признания Оптимума к его фактичес-



кому отрицанию, поскольку сам факт успешного проживания человечества на протяжении нескольких веков при температурах значительно выше современных противоречил задачам запугивания человечества грядущим потеплением. Для этих задач более ранние реконструкции МГЭИК (см. красную линию на рисунке ниже) были заменены другими версиями, игнорирующими исторические свидетельства о высоких температурах (см. синюю и черную линии там же).

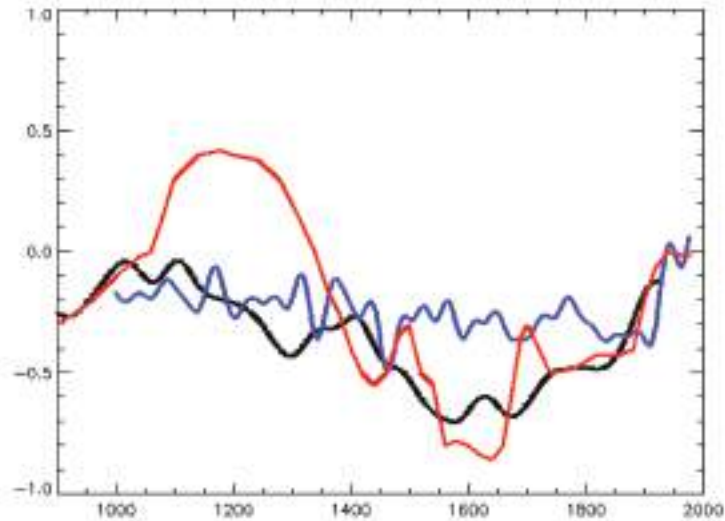


Рисунок 9.5. Ранний и поздние сценарии глобальной температуры МГЭИК.  
Источник: [108]

Своего рода хрестоматийным продуктом такой подогнанной под ответ исторической реконструкции стал печально известный график «хоккейная клюшка», разработанный американским климатологом Майклом Манном. На этом графике температура за последние 1000 лет отчетливо представлена в виде некой плоской шкалы, на фоне которой выделяется резкий взлет за последние 50-100 лет. Скандал под названием «Климатгейт» выявил реальные мотивы руководителей МГЭИК, сознательно пошедших на подтасовку первичных данных с целью доказательства беспрецедентного характера идущего в последние десятилетия потепления. По данным некоторых исследователей, проводивших проверку разработанной М. Манном климатической модели, эта модель дает устойчивый рост показателя к концу периода для любого введенного в качестве первичных данных ряда случайных чисел [108].

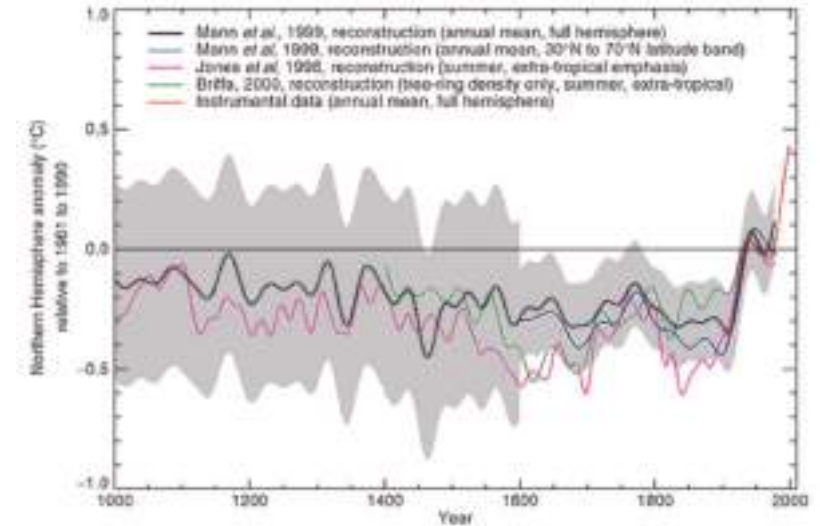


Рисунок 9.6. График «хоккейная клюшка» в версиях М. Манна, Ф. Джонса и других экспертов МГЭИК. Источник: [109]

Переписка экспертов МГЭИК, скопированная в ходе «Климатгейта» неизвестными хакерами с серверов Центра климатических исследований (ЦКИ) Университета Восточной Англии, подтверждает, что в их работе доминируют тенденциозный алармистский подход, игнорирование фактических данных и открытое желание манипулировать мнением мирового сообщества. Открылось, что эти эксперты:

- подтасовывали данные и намеренно искажали содержание баз первичных данных о температуре в разных точках земного шара, полученных от сети метеорологических станций;
- произвольно (для «подгонки» задачи под заранее намеченный ответ) подбирали так называемые корректирующие коэффициенты, используемые для моделирования температурных процессов на планете;
- замалчивали реальные данные по температурным процессам на планете, отказывали в их предоставлении независимым исследователям;
- огульно травили представителей альтернативных научных школ, блокировали их попытки представить результаты своих исследований в научной периодике.

На серьезные подозрения наводит переписка авторов Четвёртого оценочного доклада МГЭИК – того самого, за который была присуждена Нобелевская премия. Вот цитата из письма Фила Джонса, директора ЦКИ, сво-

ему коллеге из США Майклу Манну: «Майк, мог бы ты стереть все электронные письма (...), касающиеся Четвёртого оценочного доклада?». Своим британским коллегам в ходе подготовки этого доклада Каспару Эммону и Юджину Валу тот же Джонс пишет: «Постарайтесь и измените первичные данные! Не давайте скептикам козырей в руки». Уже упоминавшийся Майкл Манн призывает коллег бойкотировать журнал *Climate Research*, который высказывал сомнения в антропогенной гипотезе потепления: «Следует убедить наших коллег не представлять своих статей в этот журнал и не цитировать его». Особую заботу проявляет г-н Джонс о том, чтобы первичные данные не попали в руки общественности (например, таких независимых исследователей, как Стефен Макинтайр и Росс Маккитрик, в письме именуемых «два М»): «Два М годами охотятся за данными станций ЦКИ. Если они узнают, что в Великобритании теперь действует закон о свободе информации, я скорее сотру эти файлы, чем отдам их кому-то».

Стоит заметить, что некоторые из климатологов оказались способны на откровенное признание сложившихся проблем. Так, работающий в том же Университете Восточной Англии Майк Халм заявил по поводу «Климатгейта»: «Это событие может дать сигнал к пересмотру наших научных знаний об изменении климата. Возможно, климатическая наука стала склеротичной. Возможно, климатическая наука стала слишком ангажированной, слишком централизованной. Этот трайбализм, зафиксированный электронными письмами, как правило, характерен для примитивных культур, и неприятно видеть, как он действует в науке» [110].

Американские ученые Ричард Линдзен, Стефен Макинтайр, Росс Маккитрик и другие высказывают сомнения и в надёжности исходных данных о потеплении за последние столетия. Многие задаются вопросом: а в каких точках снималась информация? В XIX веке метеостанции базировались почти исключительно в крупных городах; да и сейчас многие из них там располагаются. Мегаполисы за последние 200 лет сильно разрослись, объёмы тепловых выбросов на их территории выросли в сотни раз за счёт промышленности, автотранспорта, отопления и так далее. Сейчас каждый крупный город – это огромное тепловое «пятно», в котором среднегодовая температура на 5–10 градусов превышает температуру в пригородах. Нетрудно понять, как «пляшут» цифры в расчётах глобальной температуры, в которые включены данные со станций, расположенных в больших городах.

Реальная картина точек съёма информации, выявленная американскими активистами, показывает, что многие термометры, входящие в официальную сеть национальных источников информации об изменении климата оказываются прикрепленными к стене, рядом с такими источниками тепловых выбросов, как рефрижератор, кондиционер, форточки, бетонные панели. Всё это

ещё более усугубляет уже имеющийся эффект городского «теплового пятна» и делает искажение данных просто неизбежным. Исследование, сделанное в 2009 году, когда 650 волонтеров проинспектировали 860 термометров из общего количества 1221 термометров наземного базирования, которые входят в сеть наблюдения Национальной администрации по океанам и атмосфере США (NOAA), показали, что из этого количества 89% не соответствуют официальным требованиям из-за размещения рядом с искусственными источниками тепла [111].

Немного лучше обстоит дело на уровне глобальной сети источников данных по температуре на планете. Из 1079 станций, входящих в глобальную сеть, 80% располагаются либо в городских агломерациях, либо в аэропортах (в которых тоже хватает искусственных источников тепла). Более того, количество станций в сети, составлявшее в 1980-х годах почти 6000, радикальным образом сократилось. За счёт каких станций произошло сокращение, и какие станции «выжили»? Среди «выживших» серьёзно увеличилась доля станций в крупных городах и аэропортах, а также в широтах, на которых эффект потепления заметнее. Также снизилась доля высокогорных станций и увеличилась доля станций на уровне моря. По данным Института экономического анализа, из более чем 400 метеостанций системы Росгидромета в глобальную сеть источников были включены всего 12 станций, которые располагались преимущественно в крупных городах и/или показали наибольший прирост температуры [112].

Но этим забота о «правильных» первичных данных не ограничивается. Существуют и такие технологии, как «корректировка» первичной информации под предлогом учёта перемещения термометров и по другим поводам. Такие корректировки, по оценкам некоторых американских экспертов, обеспечили почти весь официально объявленный «прирост» температуры в США в период 1930–1990-х годов. Кроме того, существует и практика пересмотра первичных данных спустя примерно 10 лет после их фиксации – направление пересмотра тоже нетрудно предугадать.

В конце концов, данные можно скрыть от общественности в нарушение всех законов о свободном доступе к информации и даже уничтожить – такие случаи тоже были. Например, представители Центра климатических исследований Университета Восточной Англии под давлением СМИ были вынуждены признать, что непосредственные данные замеров, на основе которых строились графики глобального потепления, были уничтожены. Информация, которая собиралась и хранилась с начала XX века, была уничтожена, по словам университетских служащих, ещё в конце 1980-х годов, во время переезда лаборатории климатологов в новое здание. По их признанию, «информация хранилась на старых носителях, плёнках, видеокассетах и прочих, и когда ла-

бораторию переводили из одного здания в другое, коробки с архивными документами и кассетами попросту сожгли. Ни у кого не было сил переводить эти данные в новые форматы».

Атмосфера нетерпимости к носителям альтернативной точки зрения, созданная климатологами-алармистами, заставляет многих несогласных озвучивать свою точку зрения только после завершения карьеры. Например, доктор Джоан Симпсон, одна из мировых топ-ученых-метеорологов, выходя на пенсию, сказала, что она, наконец, свободно говорить «откровенно» о глобальном потеплении и объявить, что «как ученый, я по-прежнему настроена скептически». Она молчала, боясь личных нападок. Доктор Симпсон была пионером в области компьютерного моделирования и отмечает очевидное: компьютерные модели еще не достаточно хороши, чтобы предсказать погоду, и тем более не могут научно предсказать глобальные климатические тенденции.

Доктор Фред Сингер, первый директор американского метеоспутниковой службы и физик д-р Зейц, президент Рокфеллеровского университета и Национальной Академии наук, утверждали, что компьютерные модели питаются сомнительными данными и используют допущения, которые определяют те ответы на вопросы о природе и трендах глобального потепления, которые ученые ожидали получить [112].

Среди ученых, в разной степени скептически относящихся к т.н. «климатическому консенсусу» можно найти лауреатов Нобелевской премии, членов Королевского общества, академиков многих стран и профессоров ведущих университетов. Ниже приводится предварительная систематизация их взглядов<sup>31</sup>.

### **ВЕДУЩИЕ УЧЕНЫЕ, ОТРИЦАЮЩИЕ КОРРЕКТНОСТЬ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МГЭИК**

Фриман Диксон, член Королевского Общества Великобритании  
Илвар Глэвер, Нобелевский лауреат по физике (1973)  
Ричард Линдзен, Заслуженный профессор Массачусетского Технологического института, член Национальной Академии наук США  
Росс МакКитрик, Заслуженный профессор Университета Гвельфа  
Патрик Мур, бывший Президент Гринпис-Канада  
Харрисон Шмидт, геолог, в прошлом Сенатор США и астронавт Apollo 17

### **ВЕДУЩИЕ УЧЕНЫЕ, УТВЕРЖДАЮЩИЕ ЧТО ГЛОБАЛЬНОЕ ПОТЕПЛЕНИЕ ВЫЗВАНО ПРЕЖДЕ ВСЕГО ЕСТЕСТВЕННЫМИ ПРИЧИНАМИ**

Салли Баллунас, в прошлом астрофизик, Гарвардский университет  
Винсент Куртиййо, член Французской Академии наук  
Уильям Харпер, Заслуженный профессор Университета Принстон  
Кари Муллис, Нобелевский лауреат по химии (1993)  
Оле Хумлум, профессор Университета Осло  
Вибьорн Карлен, Заслуженный профессор Стокгольмского Университета  
Нир Шавив, профессор Еврейского Университета Иерусалима  
Рой Спенсер, главный исследователь по метеорологии, Университет Алабамы

### **ВЕДУЩИЕ УЧЕНЫЕ, УТВЕРЖДАЮЩИЕ ЧТО ПРИЧИНЫ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ НЕ ОПРЕДЕЛЕНА**

Клод Аллегре, Заслуженный профессор Института геофизики  
Пал Брекке, астрофизик, старший советник Норвежского космического центра  
Джон Кристи, профессор по физике атмосферы, директор Центра Наук о Земле, Университет Алабамы, в прошлом – соавтор ряда докладов МГЭИК  
Петр Чилек, исследователь, Национальная Лаборатория Лос Аламос  
Стэнли Голденберг, метеоролог Национальной Службы Атмосферы и Океана (NOAA), США  
Антонио Циккини, Заслуженный профессор Университета Болоньи и Президент Всемирной Федерации Ученых

Незадолго до избрания президентом Дональда Трампа 12 сентября 2016 г. сенсацией стало то, что тысячи ученых опубликовали письмо протеста против жульнических теорий глобального потепления. Письмо против политизации проблемы потепления подписано 31,000 ученых включая 9000 обладателей ученых степеней Ph.D и выше. Ученые протестуют против примитивных концепций антропогенного потепления, углеродных налогов и ограничений на экономический рост.

<sup>31</sup> По оценке С.А. Рогинко для НИИПЭ по Контракту ДП-МДК-2018/04 от 10.04.2018 г.

Потенциал сокращения определяется техническими возможностями и экономическими показателями технологий. Регулирование выбросов метана определяется национальными законодательствами. В большинстве постсоветских стран метан отнесен к числу не только парниковых, но загрязняющих веществ, что определяет более строгое нормирование, контроль и мониторинг выбросов. Оценки прошлых глобальных антропогенных выбросов парниковых газов и различные сценарии выбросов в XXI веке показывают, что без принятия специальных мер, выбросы метана с течением времени могут возрасти (см. табл. 4.2 и раздел 6). К возможным мерам сокращения выбросов метана относятся:

- повышение энергоэффективности и снижение ресурсоемкости экономики, что приведет к снижению выбросов от источников  $\text{CH}_4$ , связанных с этими ресурсами (например, углеводородного ископаемого топлива или отходами);

- улавливание (сбор) метана (на полигонах отходов, на подготовительных этапах добычи угля и др.);

- использование специальных технологий и мероприятий, снижающих выбросы метана в существующих на настоящий момент процессах.

Далее последний пункт мероприятий будет рассмотрен более подробно на основе следующих литературных источников [2, 34, 80, 81]. Методика оценки, использованная для получения таких данных, основана (за исключением сельского хозяйства) на прогнозах выбросов метана от антропогенных источников до 2030 года серии BAU (см. раздел 6.4), составленных Агентством по защите окружающей среды США [35].

В анализе исследовалось применение различных технологий снижения выбросов  $\text{CH}_4$  в каждом секторе и их итоговый эффект в сравнении с ранее рассчитанными прогнозами на 2030 г. (см. табл. 9.1). Кроме того, для каждой из таких технологий и их совокупности была проведена оценка стоимости их внедрения и определена так называемая средняя «безубыточная углеродная цена» (break-even price) в долларах<sup>32</sup> за 1 т $\text{CO}_2\text{e}$ <sup>33</sup>, когда затраты на плату за выбросы (или выгоды) и расходы на снижение выбросов совпадают.

Антропогенные источники выбросов метана довольно разнообразны (см. табл. 4.1 и 4.2). Соответственно, пути и возможности сокращения выбросов  $\text{CH}_4$  для них будут отличаться. Далее рассмотрены только отрасли, в которых

<sup>32</sup> Здесь и далее «доллар» означает доллар США.

<sup>33</sup> В расчетах (EPA, 2013) использован потенциал глобального потепления для метана, равный 21, т.е. на 1 т $\text{CO}_2\text{e}$  приходится около 0,05 т $\text{CH}_4$

отмечен высокий потенциал сокращения выбросов метана, который можно реализовать со сравнительно небольшими затратами [34, 81]. Технически достижимый потенциал сокращения выбросов  $\text{CH}_4$  и затраты на его внедрение для разных отраслей экономике приведены в табл. 10.1.

Таблица 10.1

**Суммарный потенциал сокращения выбросов метана в % от выбросов, рассчитанных для 2030 года (базовый уровень), в зависимости от углеродной цены (GMI, 2015; EPA, 2013)**

Сектор	Затраты в расчете на 1 т $\text{CO}_2\text{e}$ , доллары США*					Выбросы в 2030 г., Мт $\text{CH}_4$	Общий потенциал сокращения (при любых затратах)
	0	15	30	45	60		
Нефть и газ	35%	42%	44%	45%	47%	101	58%
Добыча угля	10%	56%	59%	59%	59%	37	60%
Сельское хозяйство	0%	3%	10%	13%	15%	18	28%
Бытовые отходы	12%	26%	31%	32%	32%	46	61%
Сточные воды	1%	3%	5%	7%	8%	29	36%

\* - При пересчете был использован ПГП для метана, равный 21, т.е. на 1 т $\text{CO}_2\text{e}$  приходится около 0,05 т  $\text{CH}_4$

**Сельское хозяйство (обращение с навозом).** Общий потенциал сокращения выбросов от этого сектора составляет 28% от базового уровня 2030 года. Затраты на снижение выбросов в промежутке от 3 до 10% составляют соответственно от 15 до 30 долларов за т $\text{CO}_2\text{e}$ . Однако, в данном секторе применение более дорогостоящих мер (от 60 долларов за т $\text{CO}_2\text{e}$ ) не дает значительных дополнительных преимуществ в сокращении выбросов, так как дает дополнительно менее 5% сокращения выбросов.

**Нефтегазовая промышленность**<sup>34</sup>. Этот сектор представляет быстро реализуемые возможности в плане сокращения выбросов метана, с потенциалом снижения эмиссий в 35% в результате не требующих затрат мероприятий. Глобальный потенциал сокращения выбросов в секторе может составить до 44 и 49 Мт $\text{CH}_4$  в 2020 и 2030 годах соответственно (что составляет 58% от общего объема выбросов в сценарии выбросов BAU за каждый год). Почти

<sup>34</sup> С учетом различных методологических подходов оценки выбросов потенциал сокращения также оценивается экспертами по-разному (Ред).

70% этого потенциала можно достичь при углеродных ценах ниже 5 долларов США. Кроме того, более 61% сокращения (30 т CH<sub>4</sub> в 2030 году) экономически выгодно при текущих ценах на энергоносители, т.е. практически не потребует дополнительных затрат.

Увеличение затрат от 15 до 60 долларов США на тCO<sub>2e</sub> может создать дополнительные 5%, а достижение оставшихся 11% для получения максимального значения сокращения требует затрат свыше 60 долл. США. Основой для оценки затрат для этих расчетов были приняты меры по снижению выбросов метана, задокументированные программой US EPA Natural Gas STAR. Результаты расчетов финансовой возможности применения разных технологий снижения выбросов метана для разных стран и регионов и их эффект приведены в табл. 10.2.

Таблица 10.2

**Потенциал снижения выбросов в Мт CH<sub>4</sub> в нефтегазовом секторе по отдельным странам и регионам при разных углеродных ценах в 2030 году**

Страна (регион)/ Безубыточная цена (\$/тCO <sub>2e</sub> ) <sup>*</sup>	Безубыточная цена (\$/тCO <sub>2e</sub> ) <sup>*</sup>										
	-10	-5	0	5	10	15	20	30	50	100	100+
<b>Топ 5 добывающих стран</b>											
Ирак	33	34	35	4	38	39	39	41	41	43	5
Кувейт	18	2	22	23	23	24	24	24	26	28	35
Россия	18	18	66	88	9	90	98	98	105	111	127
США	38	4	40	44	44	47	47	47	50	52	67
Узбекистан	5	5	17	23	23	23	25	25	28	28	33
<b>Остальные регионы</b>											
Африка	55	6	59	62	65	65	67	68	7	71	85
Центральная и Южная Америка	15	16	16	16	17	17	18	18	18	19	24

Средний Восток	21	25	25	26	28	28	28	29	29	30	37
Европа	1	1	8	8	8	8	1	9	9	9	12
Евразия	11	11	20	2	25	25	27	3	29	31	37
Азия	19	27	28	30	33	3	34	35	36	37	43
<b>Страна (регион)/ Безубыточная цена (\$/тCO<sub>2e</sub>)<sup>*</sup></b>											
	-10	-5	0	5	10	15	20	30	50	100	100+
Северная Америка	14	2	19	20	21	21	21	22	22	23	28
Итого	253	276	355	401	413	421	437	442	462	48	58

\* - В расчетах (EPA, 2013) использован потенциал глобального потепления для метана, равный 21, т.е. на 1 тCO<sub>2E</sub> приходится около 0,05 тCH<sub>4</sub>

**Угледобывающая промышленность.** Общий потенциал снижения выбросов в этом секторе (для подземной добычи угля) составляет примерно 60% от общего объема ежегодных выбросов в 2030 году. Максимальный потенциал сокращения выбросов в угледобывающем секторе составляет 19 и 22 МтCH<sub>4</sub> в 2020 году и 2030 году соответственно.

Свыше 56% всего возможного сокращения выбросов (что составляет почти весь возможный потенциал сокращения) в этой отрасли можно достичь при увеличении стоимости от 0 до 15 долларов за тCO<sub>2e</sub>. После этого возможности снижения будут продолжать оставаться на одном уровне, несмотря на увеличение средств на проведение таких мер. Кроме того, приблизительно 4 МтCH<sub>4</sub> сокращений являются экономически эффективными в текущих прогнозируемых ценах на энергию (т.е. без дополнительных затрат).

**Отходы.** Глобальный потенциал сокращения выбросов метана в секторе захоронения твердых бытовых отходов составляет приблизительно 28 МтCH<sub>4</sub> в год к 2030 году или 61% от этих базовых выбросов. В данной отрасли более 25% сокращения можно осуществить с минимальными затратами, составляющими 15 долларов за тCO<sub>2e</sub>. Далее при росте затрат их эффективность в отношении сокращения выбросов будет уменьшаться – при росте затрат в расчете на МтCO<sub>2E</sub> на 10% выброс будет сокращаться на 1%. Однако, с затратами более 60 долларов за тCO<sub>2e</sub> существует возможность добиться сокращения выбросов дополнительно еще на 30%. Кроме того, существует



приблизительно от 3 до 4 МтСН<sub>4</sub> сокращений, которые являются экономически эффективными по текущим ценам на энергоносители.

**Сточные воды.** Общий потенциал сокращения выбросов метана в секторе очистки сточных вод – 36% от базового уровня выбросов 2030 г., что составит 10 МтСН<sub>4</sub>. Дорогостоящие меры по снижению выбросов метана в этой отрасли сдерживают уровень их снижения, вклад которого может быть менее 5% при ценах на углерод до 30 долларов за тСО<sub>2е</sub>. При затратах 60 долларов за тСО<sub>2е</sub> можно поднять эту цифру до 8%. В этом секторе можно достичь только 1% сокращения выбросов без дополнительных затрат.

Все эти оценки по разным секторам экономики основаны на прогнозе, где в отсутствие применения описанных технологий снижения выбросов, в период с 2015 по 2020 г. суммарные выбросы СН<sub>4</sub> от обращения с навозом, очистки сточных вод и обращения с отходами увеличатся примерно на 6%, а выбросы от угледобывающей и нефтегазовой промышленности возрастут, соответственно, на 14 и 10% (см. табл. 10.1).

В целом по всем этим отраслям потенциал сокращения выбросов метана от уровня выбросов 2030 года без дополнительных финансовых затрат составляет примерно 45 МтСН<sub>4</sub>. При поднятии затрат до 60 долларов за тСО<sub>2е</sub> он может быть удвоен, что составляет более 70% возможного сокращения во всех этих пяти секторах. Краткое описание предлагаемых технологий и подходов к снижению выбросов метана приведены в табл. 10.3.

Следует отметить, что в настоящее время разработка необходимых мер ограничения и контроля выбросов метана, включая применение специальных технологий для снижения эмиссий, ведется правительственными организациями и научными институтами, а также непосредственно промышленными компаниями. Их внедрение может производиться как на уровне стран, так и на уровне отдельных компаний или их объединений, и включать как добровольные, так и обязательные для выполнения меры, а также стимулироваться экономически на разных уровнях. Следует отметить, что отличием СН<sub>4</sub> от других ПГ является его отнесение в некоторых странах (в том числе России) к загрязнителям воздуха, уже включенным в существующую систему мониторинга и снижения выбросов, а также возможность получения дополнительных экономических выгод при сохранении его как ценного топливного ресурса или химического сырья.

Многие из имеющихся в настоящее время возможностей снижения выбросов метана связаны с получением сопутствующих выгод. Некоторые технологии снижения выбросов включают его регенерацию и использование в качестве топлива как для производства электроэнергии, так и для транспорта. Кроме того, метан является основным элементом природного газа, поэтому его сбор и утилизация дает еще один ценный и экологически чистый (при горении)

энергоноситель. К тому же метан, утилизированный в сельском хозяйстве в процессе переработки навоза, и свалочный метан относят к возобновляемым источникам энергии. Производство энергии из этого СН<sub>4</sub> дает возможность отказаться от применения других энергоносителей с высокой степенью выбросов СО<sub>2</sub> и загрязняющих веществ, таких как дерево, каменный уголь и нефть. Кроме того, сбор и удаление метана из угольных шахт может также улучшить производственную безопасность, поскольку при этом снижается опасность возникновения взрывов.

Для ознакомления с существующими возможностями снижения выбросов СН<sub>4</sub> и предполагаемыми их вариантами в будущем, можно обращаться как непосредственно к разработчикам, так и в объединения, в том числе международные, исследующие эффективность их применения и продвигающие их применение в мире (GMI, CCAC, WRI, UNECE, Natural Gas STAR<sup>35</sup>), а также данная информация представлена в отчетности газовых компаний: ПАО «Газпром», Статойл (Экинор) и др.

Таблица 10.3

#### Основные возможности для снижения выбросов СН<sub>4</sub> в различных секторах (GMI, 2015)

Источники метана	Технологии снижения выбросов
<b>Нефть и газ</b> Выбросы СН <sub>4</sub> возникают во время обычной эксплуатации, плановых ремонтно-профилактических работ и сбоев в работе систем в нефтяной и газовой отраслях промышленности, как при добыче, так и при транспортировке и переработке нефти и газа	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Внедрение систем мониторинга и реализация программ по ремонту оборудования для снижения выбросов или утечек газа;</li> <li>- Модернизация технологий и оборудования для снижения или полного прекращения выбросов или утечек газа;</li> <li>- Оптимизация технического обслуживания и модернизация оборудования для проведения более точных измерений и контроля выбросов метана или сопутствующих параметров;</li> <li>- Применение систем сбора метана и утилизация метана, в том числе в составе попутного нефтяного газа.</li> </ul>

<sup>35</sup> По данным [83]

<p><b>Угольные шахты</b> Метан выделяется из действующих и заброшенных подземных угольных шахт и открытых карьеров при добыче угля, а также при его переработке, хранении и перевозке.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Дегазация угольных пластов (путем бурения скважин для сбора метана при эксплуатации шахт) и его дальнейшая утилизация или использование;</li> <li>- Утилизация метана при его низкой концентрации в выбросах вентиляционных установок для производства тепла путем оксидизации с целью производства электроэнергии или других нужд.</li> </ul>
<p><b>Бытовые отходы</b> Выделение CH<sub>4</sub> в процессе разложения органических отходов в анаэробных условиях, которые являются типичными для объектов захоронения отходов</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Рекуперация биогаза с применением ряда скважин и трубопроводов, собирающих и доставляющих его к местам утилизации путем сжигания (в том числе для получения электроэнергии) или применения для производства топлива или других нужд.</li> </ul>
<p><b>Обращение с навозом (сельское хозяйство)</b> CH<sub>4</sub> выделяется при разложении навоза или помета, хранящегося или обрабатываемого в системах, способствующих созданию анаэробной среды (т.е. при хранении его в отстойниках, прудах, резервуарах или ямах).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Сбор выделяемого биогаза в закрытых анаэробных отстойниках для его дальнейшей утилизации или использования;</li> <li>- Использование метантенков, компостирующих органические отходы в бескислородной среде и выделяющих метан, пригодный для сбора и дальнейшего применения.</li> </ul>
<p><b>Сточные воды</b> CH<sub>4</sub> выделяется при разложении органических веществ сточных вод в анаэробных условиях</p>	<p>Применение:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- метантенков для обработки ила (внедрение или переоборудование существующих аэробных очистных систем);</li> <li>- систем улавливания биогаза на существующих открытых анаэробных отстойниках;</li> <li>- новых централизованных аэробных систем очистки сточных вод или закрытых отстойников;</li> <li>- систем улавливания и сжигания биогаза для его утилизации, в том числе с получением электричества или тепла.</li> </ul>

# 11

## ГАЗОВАЯ ОТРАСЛЬ КАК ИСТОЧНИК ЭМИССИИ МЕТАНА В АТМОСФЕРУ

Природный газ играет ключевую роль в мировой экономике. Газовая промышленность – относительно молодая и быстро развивающаяся отрасль топливно-энергетического комплекса.

Основной продукт газовой отрасли – природный газ – является самым экологичным из ископаемых энергоносителей и ценным химическим сырьем. Природный газ состоит на 80-99 % из метана, на 1-5% этана, пропана, бутана и др. газообразных веществ.

Метан – основной компонент природного газа – отнесен к парниковым газам. В этой связи управление выбросами в газовой отрасли, несмотря на достаточно скромный вклад в суммарные объемы выбросов из антропогенных источников, находится в фокусе внимания мирового сообщества в свете решения глобальной проблемы изменения климата.

В последнее время было проведено несколько исследований в целях оценки глобальных выбросов от нефтегазового сектора. Сравнение указанных оценок представлено в Прогнозе мировой энергетики Международного энергетического агентства.

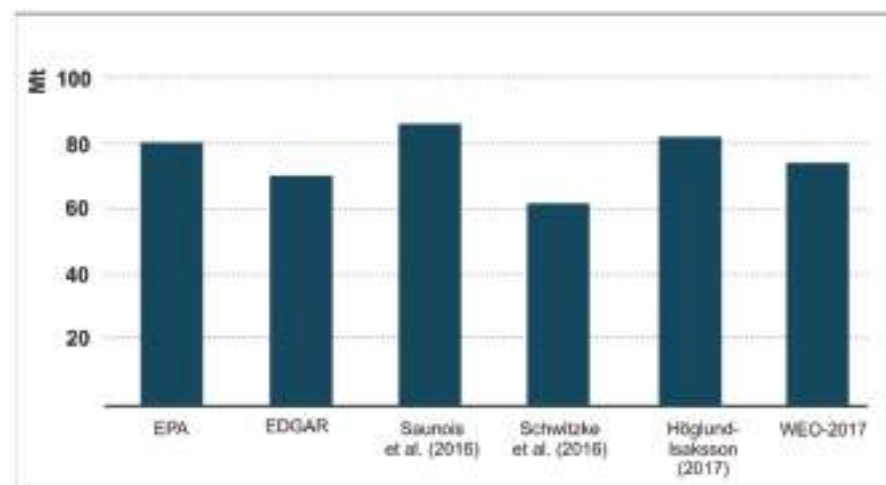


Рисунок 11.1. Сравнение последних оценок глобальных выбросов метана от нефтегазовой отрасли (Международное энергетическое агентство, World Energy Outlook 2017)

При этом следует отметить, что доля выбросов метана от газовой отрасли незначительна по сравнению с другими источниками. Для сравнения, выбросы метана в газовой промышленности относительно невелики: Европейское агентство по окружающей среде (ЕЕА) сообщало, что в 2015 году выбросы метана от газовых операций составили 5% от общего объема выбросов метана в ЕС, что эквивалентно 0,6% от общего объема выбросов ПГ в ЕС. В странах ЕС существует два крупнейших источника выбросов метана: животноводство (внутренняя ферментация), очистка сточных вод и полигонное захоронение отходов (рисунок 11.2). Вместе они составляли 53% выбросов метана в 2015 году<sup>36</sup>.

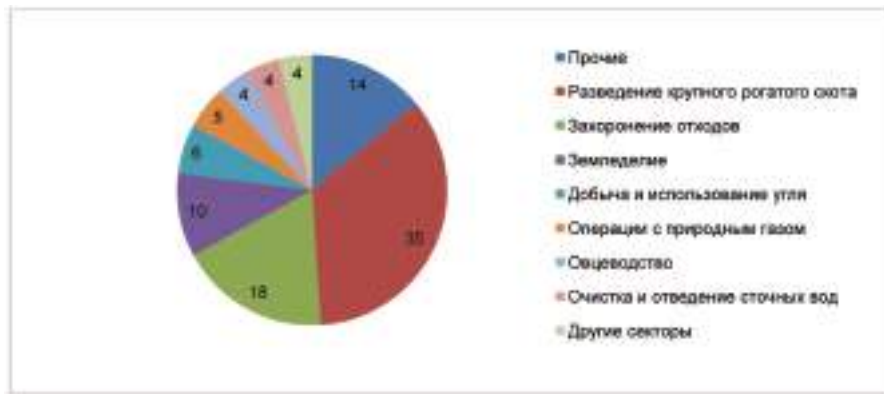


Рисунок 11.2. Доля ключевых категорий источников выбросов метана для ЕС 28 и Исландии, 2015, %. (Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2015 and inventory report 2017)

Основными видами деятельности в газовой отрасли являются: геолого-разведка, добыча, транспортировка, хранение, переработка и распределение природного газа.

Способы добычи природного газа изменяются с развитием технологий. На сегодня наиболее распространённым способом добычи природного газа (т.н. традиционного) является бурение скважин на глубины от 1000 и более метров. Предварительно проводится геологическая разведка местности, позволяющая найти и оценить объемы газовых залежей.

В добыче сланцевого газа используется метод гидроразрыва плотных газоносных пластов – в пробуренные полости закачивается вода, которая вытесняет газ и занимает его место. Этот способ имеет серьезные недостат-

<sup>36</sup> Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2015 and inventory report 2017: <https://www.eea.europa.eu/publications/european-union-greenhouse-gas-inventory-2017>

ки, основным из которых является наличие высоких экологических рисков. Газ не удается собрать в полном объеме, и часть его выходит на поверхность, а часть просачивается в грунтовые воды, которые загрязняются еще и при гидроразрыве пласта.

Особенностью газовой отрасли с точки зрения выбросов метана является то, что природный газ активно используется в процессах производства и потребляется на собственные технологические нужды. Технологически обусловленные и неизбежные потери метана в операциях по поддержанию требуемого режима эксплуатации газовой отрасли преимущественно и определяют объемы его эмиссии в атмосферный воздух.

От применяемых в газовой отрасли технологий и практик, уровня эффективности зависит уровень выбросов метана. По оценкам Международного энергетического агентства, в среднем уровень выбросов метана составляет 1,7% от общего объема природного газа по всей производственной цепочке.

Потенциальные источники выбросов метана в жизненном цикле природного газа от скважины до потребителя укрупненно представлены в таблице 11.1.

Таблица 11.1

**Основные потенциальные источники выбросов метана в жизненном цикле природного газа**

Этап	Источник	Пример
Разведка	Бурение и гидравлический разрыв пласта	Выделение газа в атмосферу
	Освоение скважин	Выделение газа в процессе освоения скважин
Добыча	Сжигание (внеплановое)	Несгоревший метан
	Откачивание жидкости	Газ выделяется во время откачивания
	Стравливание	Стравливание из оборудования при ремонтах и технологических операциях
	Фугитивные эмиссии	Утечки из оборудования

Переработка	Сжигание (внеплановое)	Несгоревший метан
	Использование топлива	Несгоревший метан
	Фугитивные эмиссии и стравливание	Утечки и стравливание из оборудования
Трубопроводный транспорт, подземное хранение, распределение	Использование топлива	Несгоревший метан
	Стравливание	Стравливание из оборудования при ремонтах и технологических операциях
	Фугитивные эмиссии	Утечки из оборудования
Использование	Утечки и «проскок» метана	Несгоревший метан в газовых двигателях, бытовых и промышленных газовых приборах

Причинами выбросов метана являются: использование газа на собственные технологические нужды (в том числе на ремонты), нормативные потери газа, фугитивные эмиссии и аварии.

Главные направления расхода газа на собственные технологические нужды предприятий добычи, транспорта, переработки, хранения и распределения газа, так называемые технологические потери газа, состоят из расхода газа на топливные и прочие технологические нужды (организованные выбросы в атмосферу) и технологических потерь с утечками (неорганизованные выбросы в атмосферу).

Для определения уровня выбросов компаниями проводится инвентаризация источников. Методы, с помощью которых в настоящее время проводится контроль эмиссий природного газа (метана) на объектах газовой промышленности, подразделяются на контактные и дистанционные (лазерные и инфракрасные детекторы метана; приборы бортового базирования, осуществляющие поиск утечек метана с воздуха на большом расстоянии; стационарная автоматизированная лазерная система постоянного мониторинга утечек метана на территориях компрессорных станций), с которыми также сочетаются специфические методы – органолептический, акустический, биоиндикационный, прогнозно-расчетный.

Существует также балансовый метод (входящий в подгруппу расчетных методов), который учитывает объем газа на входе и выходе из системы. Наиболее предпочтительным является метод, основанный на инструментальном поиске и замере потерь метана с утечками, позволяющий достаточно корректно установить места утечек метана и измерить их объем.

Учитывая, что выбросы метана по факту являются потерей товарного про-

дукта, газовые компании внедряют смягчающие меры и передовые методы для дальнейшего сокращения выбросов метана. Например, в Европейском Союзе в период с 1990 по 2015 год в результате усилий, предпринимаемых газовой промышленностью, выбросы метана от газовых операций сократились на 46%.

Технической ассоциации европейской газовой промышленности (Маркогаз) был проведен анализ выбросов метана для основных видов деятельности. По данным Маркогаза, потери метана (доля от объема продаж газа) составляют:

- при транспортировке газа – 0,05 %,
- при подземном хранении газа – 0,01 %,
- при распределении газа 0,1-0,2 %.

Наилучшими мировыми практиками в области предотвращения и снижения выбросов метана, которые применяются также в ПАО «Газпром» являются:

- использование энергосберегающих технологий при проведении планово-предупредительных ремонтов на производственных объектах таких, как перепуски газа из отключенного контура компрессорного цеха или линейного участка магистрального газопровода в соседние, работающие участки, использование мобильных компрессорных станций, выработка газа из отключаемого участка газопровода на собственные технологические нужды и т.п.;
- ремонт дефектных труб полимерными композиционными материалами;
- использование технологии врезки под давлением и замены дефектных участков трубопроводов стеклопластиковыми муфтами с резьбовой затяжкой при ремонтных работах на газопроводах;
- замена кранов и установка разрезных муфт без прекращения транспорта газа;
- использование сухих газовых уплотнений для уплотнения валов компрессоров;
- внедрение схем продувки пылеуловителей на компрессорных и газораспределительных станциях без стравливания газа в атмосферу;
- проведение газодинамических и геофизических исследований скважин без выпуска природного газа в атмосферу с использованием средств телеметрии;
- замена задвижек без глушения скважин;
- утилизация газов выветривания с их улавливанием и рекуперацией;
- оптимизация работы технологических объектов;
- использование компрессоров с электрическим приводом;
- реализация программ мониторинга фугитивных выбросов метана и использование современного оборудования и средств обнаружения утечек и многие другие мероприятия.

Благодаря реализации комплекса указанных мероприятий потери природного газа в Единой системе газоснабжения России в 2009–2017 годах были снижены в 2,4 раза.

На протяжении уже многих лет газовая промышленность работает над сокращением выбросов метана с помощью обязательных и добровольных программ: Глобальную инициативу по метану, «Natural Gas Star», Климатическую инициативу по нефти и газу и т.д.

В дополнение к совместным инициативам, ведущие газовые компании мира имеют индивидуальные программы по сокращению выбросов метана. Ведущие энергетические компании мира BP, Eni, ExxonMobil, Repsol, Shell, Statoil, Total, Wintershall и Газпром заявили о своих обязательствах, подписав Руководящие принципы по снижению выбросов метана в производственно-сбытовой цепочке природного газа.

## 12

## УГЛЕРОДНЫЙ СЛЕД ПРИРОДНОГО ГАЗА И ЕГО РОЛЬ В ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИКИ

В настоящее время климатические аспекты приобретают всё большее значение для энергетического сектора. Одним из ключевых показателей на рынке энергоресурсов становится «углеродный след» (выбросы парниковых газов по всей производственной цепочке).

Природный газ как один из видов энергоресурсов имеет решающее значение для перехода к низкоуглеродной экономике. Его использование для производства электроэнергии приводит к эквивалентным выбросам углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) на 40-50%, чем от использования угля, даже с учетом эмиссий метана ( $\text{CH}_4$ ) в технологических процессах. При этом выбросы  $\text{CO}_2$  могут быть дополнительно уменьшены за счет внедрения инновационных технологий, перехода на метано-водородное топливо. Газификация регионов, перевод электрогенерации и транспортного сектора на природный газ положительно влияет на качество воздуха, поскольку сжигание метана характеризуется низкими выбросами оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) и практически полным отсутствием диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ), исключает выбросы твердых частиц.

Необходимо отметить, что газовая отрасль уже внесла значительный вклад в сокращение углеродоёмкости глобальной экономики. Замещение угля в электрогенерации на природный газ и нефтепродуктов на транспорте является быстрым и экономически эффективным способом формирования низкоуглеродного будущего.

Газовая промышленность в настоящее время уделяет все большее внимание проблемам сокращения собственного «углеродного следа». Сокращение энергопотребления (рис. 12.1) при повышении давления в магистральных газопроводах при транспортировке газа обеспечивает значительное сокращение выбросов парниковых газов.

Например, использование северного экспортного коридора при поставках российского газа в Европейский союз обеспечивает значительное снижение углеродного следа газа.

Следует также отметить, что трубопроводные поставки в ЕС имеют меньший углеродный след, чем поставки сжиженного природного газа (СПГ) в связи со значительными выбросами при сжижении. На рисунке 12.3 приведено сравнение удельных выбросов парниковых газов при поставках газа в Центральную Европу из Катара, США и России.





Рисунок 12.1. Энергоэффективность новых российских экспортных газовых потоков



Рисунок 12.3. Выбросы парниковых газов при поставках природного газа в Центральную Европу (Исследование Thinkstep)



Рисунок 12.2. Сравнение экспортных коридоров для транспортировки российского природного газа в западноевропейские страны

В последние годы газовая отрасль становится драйвером низкоуглеродного развития, обеспечивая устойчивость энергообеспечения, в том числе за счёт нивелирования неравномерности работы ВИЭ. Природный газ остается основой для развития водородной энергетики. По прогнозам экспертов, газовая отрасль будет и в дальнейшем обеспечивать потребителей низкоуглеродной энергией для устойчивого развития.

Адекватная оценка роли метана в изменении климата является критичной для принятия научно обоснованных политических решений, в том числе в области развития глобальной энергетики. В целях проведения объективного анализа данных и существующих методик в работе представлены как традиционные подходы, так альтернативные оценки, которые имеют научное обоснование, но не получили широкого распространения среди общественности по разным причинам.

### 13.1. ОЦЕНКА РОЛИ МЕТАНА В ТЕОРИИ ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА<sup>37</sup>

В XX веке масштаб антропогенного воздействия на климатическую систему Земли стал глобальным. Развитие мирового хозяйства, особенно во второй половине XX века, привело к существенному обогащению атмосферы парниковыми газами (углекислым газом  $\text{CO}_2$ , метаном  $\text{CH}_4$ , закисью азота  $\text{N}_2\text{O}$  и др.) вследствие их выбросов в атмосферу в ходе хозяйственной деятельности. Обогащение атмосферы парниковыми газами усиливает естественный парниковый эффект, что приводит к потеплению в приповерхностном слое атмосферы и к другим изменениям климата. В период 1880-2012 гг. температура выросла на  $0,85^\circ\text{C}$ , и большая часть этого потепления связана с антропогенным усилением парникового эффекта. Это потепление неравномерно: нагрев суши происходит более активно в сравнении с океаном, а некоторые участки суши, в свою очередь, нагреваются сильнее, чем суша в среднем. Последствия такого потепления сказываются на природных и социальных системах, а также здоровье населения, что вызывает беспокойство в общественных, научных и правительственных кругах многих стран. В особенности вызывает тревогу, что, по оценкам, экспертов к концу XXI века ожидается усиление глобального потепления – до нескольких градусов по сравнению с уровнем конца XX века в зависимости от путей развития мирового хозяйства и реализации мер сдерживания глобальных выбросов парниковых газов.

Среди трех основных парниковых газов –  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{N}_2\text{O}$  – в расчете на равные количества выбросов каждого вещества наибольшее влияние на климатическую систему оказывает закись азота  $\text{N}_2\text{O}$ , следующий по эффекту – метан  $\text{CH}_4$ , и далее углекислый газ  $\text{CO}_2$ . И по влиянию на среднюю температуру в приповерхностном слое заданного малого долговременного увеличе-

<sup>37</sup> С.М. Семенов, И.Л. Говор, Н.Г. Уварова для НИИПЭ по контракту ДП-МДК-2017-01 от 18.05.2017. (Ред.)

ния концентрации парникового газа (в единицах объемного отношения смеси,  $\text{млн}^{-1}$ , например) в атмосфере – на первом месте  $\text{N}_2\text{O}$ , затем  $\text{CH}_4$ , затем  $\text{CO}_2$ .

Однако в абсолютном выражении наиболее важным парниковым газом является и скорее всего будет оставаться в XXI веке  $\text{CO}_2$  по той причине, что рост объемов его глобальной эмиссии намного превосходит рост выбросов двух других газов. И в уже произошедшем парниковом потеплении, и в ожидаемом в течение XXI века, «первую скрипку» играет диоксид углерода. Метан имеет меньшее значение. С 1750 по 2011 год основные парниковые газы оказали следующее радиационное воздействие на климатическую систему Земли:  $\text{CO}_2$   $1,82$  ( $1,63 - 2,01$ )  $\text{Вт м}^{-2}$ ,  **$\text{CH}_4$   $0,48 \pm 0,05$   $\text{Вт м}^{-2}$** ,  $\text{N}_2\text{O}$   $0,17 \pm 0,03$   $\text{Вт м}^{-2}$ . За тот же период времени суммарное радиационное воздействие всех парниковых газов составило  $2,83$  ( $2,54 - 3,12$ )  $\text{Вт м}^{-2}$ . На долю метана при этом приходится 17%.

Современный естественный глобальный выброс метана составляет около  $347$   $\text{Мт CH}_4/\text{год}$ <sup>38</sup>, причем 63% – с заболоченных территорий. Его основные источники: заболоченные территории, различные водные объекты (озера, реки, моря и океаны), пожары, ферментация корма в желудке жвачных животных и насекомых, оттаивающая многолетняя мерзлота, метангидраты, месторождения углеводородов, некоторые другие глубинные геологические источники.

Современный антропогенный выброс метана оценивается в  $331$   $\text{Мт CH}_4/\text{год}$ <sup>39</sup> (по другим оценкам –  $325$   $\text{Мт CH}_4/\text{год}$ ), что составляет около половины от его общей эмиссии в атмосферу. Основными источниками этих выбросов являются: рисовые поля, жвачные сельскохозяйственные животные (27% суммарного антропогенного выброса), нефтегазовая промышленность (23%), твердые отходы и сточные воды, шахтный метан угольных месторождений, горение биомассы и сжигание топлива. Вклад России в антропогенные выбросы  $\text{CH}_4$  составил около 8%.

При этом следует отметить, что, к сожалению, многие процессы, ведущие как естественным, так и антропогенным выбросам  $\text{CH}_4$ , ещё недостаточно изучены и зависят от многих факторов, что в итоге может приводить к заметным расхождениям в оценках разных авторов и лет.

По оценкам, время жизни метана в атмосфере составляет  $12,4$  лет<sup>40</sup>. Он безвозвратно расходуется главным образом в реакциях с гидроксильным

<sup>38</sup> Данные МГЭИК для 2000-2009 гг. при оценке «снизу вверх»

<sup>39</sup> Данные МГЭИК для 2000-2009 гг. при оценке «снизу вверх»

<sup>40</sup> В последнее время наблюдается уменьшение времени пребывания метана в атмосфере (его «времени жизни») в связи с ростом содержания в атмосфере гидроксильного радикала  $\text{OH}$ , разрушающего метан, и, как следствие, интенсификацию стока  $\text{CH}_4$  [Prather M.J., Holmes C.D., Hsu J. Reactive greenhouse gas scenarios: Systematic exploration of uncertainties and the role of atmospheric chemistry // Geophysical Research Letters. 2012. V.39. L09803. doi:10.1029/2012GL051440], [Kiselev A. A., Karol I.L. Modeling of the long-term tropospheric trends of hydroxyl radical for the Northern Hemisphere // Atmospheric Environment. 2000. V.34. P.5271–5282] (Ред.)

(в основном в тропосфере) и атомарным хлором (в основном в стратосфере). Наземные стоки метана из атмосферы практически отсутствуют. Реалистичной технологической возможности ускорить сток метана из атмосферы не существует.

Такое небольшое, по сравнению с углекислым газом, время жизни  $CH_4$  привлекает в последнее время к нему повышенное внимание при решении проблемы регулирования выбросов парниковых газов. Ведь меры по сокращению антропогенных выбросов метана заметно скажутся на уровне его содержания в атмосфере уже в течение одного-двух десятилетий. При разработке подобных мер следует иметь в виду, что все же основной причиной современного глобального потепления является углекислый газ  $CO_2$ , в метан  $CH_4$  играет заметную, но лишь второстепенную роль.

### 13.2. КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ РОЛИ МЕТАНА В ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА

Метан является важным представителем органических веществ в атмосфере [148, 149]. Обнаружили его в атмосфере сравнительно недавно – в 1947 году [144]. Концентрация его не велика и с 1999 года стабилизировалась на уровне 1,75 ppm. Для сравнения – концентрация  $CO_2$  в атмосфере составляет 400 ppm.

Влияние метана необходимо рассматривать на основе общего баланса парниковых газов. В числе парниковых газов второе место после  $CO_2$ , по мнению многих, занимает  $CH_4$ . Вместе с тем, пары воды методологически исключаются из оценки, хотя очевидно, что главный парниковый газ –  $H_2O$ . Вклад  $H_2O$  в парниковый эффект оценивается в 36 – 72%,  $CO_2$  в 9 – 26% и  $CH_4$  в 4 – 9% [158–162], то есть **баланс воды, наряду с балансом энергии, является основополагающим фактором глобальной климатической стабильности**. Водяной пар – естественный регулятор процессов в атмосфере. В гидрологическом цикле участвует 12 – 14 тыс. км<sup>3</sup> воды (1/2 Байкала). Ежегодно происходит 45 циклов. Длительность их 7 – 10 дней. Осадки и испарения равны между собой (577 тыс. км<sup>3</sup> в год).

В атмосфере метан находится в основном в приземном слое, в тропосфере, толщина которого составляет 11 – 15 км. Концентрация метана мало зависит от высоты в интервале от поверхности Земли до тропопаузы, что обусловлено большой скоростью перемешивания по высоте в пределах 0 – 12 км (1 месяц) в сравнении со временем жизни метана в атмосфере [148]. Концентрация метана в атмосфере, определяемая по изучению ледяного покрова на станции «Восток» в Антарктиде, показала, что концентрация за последние 150 000 лет

колебалась с периодом 20 тыс. лет, что доказывает естественность этих колебаний.

Общее содержание метана в атмосфере – около 5 млрд т, при этом ежегодные изменения, оцениваемые в 592 – 785 млн т, практически равны выбросам (542 – 852 млн т). Анализ источников образования метана показывает, что источником №1 является болота (21%), второе место – рисовые поля (20%), которые по сути представляют собой те же болота, только рукотворные. Если этот источник метана ликвидировать, то появляются угрозы продовольственной безопасности. Такой же вопрос связан с выбросами от жвачных животных (коров) (15% от общей эмиссии метана).

В докладе ООН признается, что быстро растущие стада домашнего скота являются большой угрозой для климата, лесов и дикой природы. Животноводство дает 18% парниковых газов, больше чем автомобили, самолеты и все другие виды транспорта, вместе взятые. Сжигание топлива для производства удобрений, необходимых для выращивания кормов, для производства мяса и его доставки потребителям – и уничтожение растительности под пастбища – дает 9% общей эмиссии диоксида углерода [151].

Другие источники метана: горение биомассы (10%), угольные шахты, свалки (7%). Метаногираты, которые часто «обвиняют» в выделении метана, дают всего 1%. Метан угольных шахт (7%) не только связан со значительными жертвами людей, но и увеличивает углеродный след использования угля в электрогенерации.

По данным оценочных докладов МГЭИК [158-162], общий выброс метана от природных и антропогенных источников приведен в таблице 13.1.

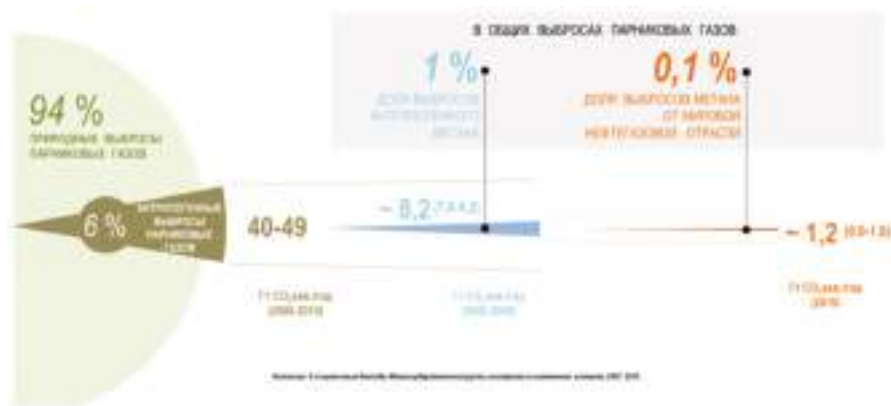
Таблица 13.1

Источники выброса метана в атмосферу, млн т/год

Природные выбросы		Антропогенные выбросы	
Источники	млн т/год	Источники	млн т/год
Болота	217	Жвачные животные	89
Океан	54	Отходы	75
Озера и реки	40	Нефтегазовая отрасль (включая биотопливо)	50
Дикие животные	15	Рисовые поля	36
Термиты	11	Сжигание биомассы	35
Гидраты	6		

Пожары	3	Прочие	46
Вечная мерзлота	1		
<b>Природные выбросы</b>		<b>Антропогенные выбросы</b>	
<b>Итого, млн т/год</b>	<b>347</b>	<b>Итого, млн т/год</b>	<b>331</b>
<b>Итого, %</b>	<b>57,9%</b>	<b>Итого, %</b>	<b>45,1%</b>

Доля антропогенных выбросов метана в общих выбросах парниковых газов и вклад нефтегазовой отрасли представлены на рисунке 13.1.



**Рисунок 13.1.** Доля выбросов метана от газовой отрасли в общих выбросах парниковых газов. Источник: 5-й оценочный доклад Межгосударственной группы экспертов по изменению климата, 2013

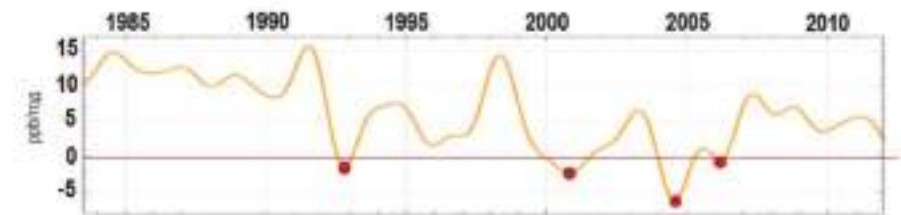
Американские климатологи впервые провели прямую экспериментальную оценку парникового эффекта метана в результате полевых измерений. Если предыдущие оценки парниковой активности метана строились на основании расчетов и лабораторных экспериментов, то сейчас радиационный прогрев приповерхностных слоев атмосферы удалось однозначно связать с динамикой концентрации метана непосредственно в результате спектрометрических атмосферных измерений. Они пишут, что концентрация метана в атмосфере держалась примерно на постоянном уровне с 1995 по 2006 год, после чего начала расти. Однозначного объяснения подобной динамики концентрации метана на данный момент не предложено [164].

Американские климатологи под руководством Даниэля Фельдмана (Daniel Feldman) из Национальной лаборатории имени Лоуренса в Беркли

провели исследование, которое связывает динамику концентрации углекислого газа в атмосфере с радиационным прогревом атмосферы – разницей между энергией поступающего на Землю солнечного излучения и исходящего излучения. В обсерватории, расположенной в южной части Великих равнин, с 2002 по 2013 год проводились независимые измерения концентрации метана в приповерхностном слое атмосферы и его радиационный эффект, который вычислялся с помощью спектрометрических радиометров. Чтобы избежать возможного влияния облаков, измерения радиационного прогрева проводились в ясную погоду.

Ученые отмечают, что несмотря на довольно значительную погрешность определения концентрации метана, проведенные измерения подтвердили предыдущие данные о динамике содержания метана за последние 20 лет: до 2006 года концентрация газа держалась примерно на постоянном уровне (около 1880 объемных долей метана на миллиард), после чего начался его монотонный рост со средней скоростью около 7,5 объемных долей на миллиард в год. Ученые отмечают, что на полученные данные могли оказать влияние содержащиеся в атмосфере водяные пары, поэтому в дальнейшем для более точной оценки отдельных вкладов двух газов должны быть проведены дополнительные исследования. Тем не менее, и полученные сейчас результаты измерений связывают данные о концентрации метана с его парниковым эффектом непосредственно с помощью полевых измерений. До этого все подобные оценки проводились или теоретически или в лабораторных экспериментах.

Динамика изменения концентрации метана в атмосфере, о которой указывалось выше и в 5-м Оценочном докладе [157 – 162] представлена на рис. 13.2. Рост концентрации иногда переходит в снижение концентрации.

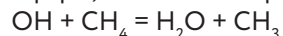


**Рисунок 13.2.** Динамика роста/снижения концентрации метана в атмосфере

Если концентрация метана в атмосфере не растет, то это означает, что скорость поступления метана в атмосферу равна скорости его вывода.



Метан исчезает из атмосферы, в основном в реакции с радикалом OH:

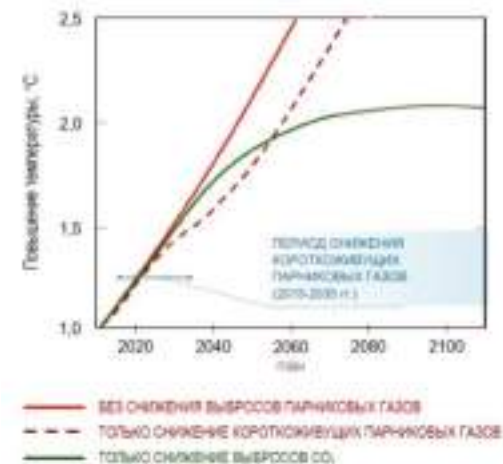


**Механизм изменения концентрации, вероятно, имеет собственный природный характер и аналогичен механизму регулирования балансом водяного пара.**

В исследовании [163] «Глобальные биогеохимические циклы увеличения содержания метана в атмосфере: рост в 2007 – 2014 гг. и изотопное смещение», приведенными пятнадцатью влиятельными институтами Великобритании, США, Новой Зеландии, Канады, ЮАР и др. стран показано, что глобально усредненная молярная доля метана в атмосфере увеличилась с 2007 по 2013 год на  $5,7 \pm 1,2$  частей на миллиард (млрд<sup>-1</sup>) в год. В тоже время, показатель  $\delta^{13}C_{CH_4}$  (соотношение изотопов углерода <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C в метане), начиная с 2007 года, сместился в сторону существенно более отрицательных значений. Экстремальное значение прироста на  $12,5 \pm 0,4$  млрд<sup>-1</sup> было зафиксировано в 2014 году, дальнейшее смещение в сторону более отрицательных значений наблюдалось в большинстве широт. Представленное здесь изотопное доказательство, свидетельствует о том, что на рост метана больше всего оказывает влияние значительное увеличение биогенных выбросов метана, в особенности в тропиках, например, в связи с расширением площадей тропических заболоченных земель в годы с аномально большим количеством атмосферных осадков или в связи с увеличением количества источников выбросов метана от сельского хозяйства, таких как жвачные животные и рисовые поля. Изменения аналогичные изменениям в скорости удаления метана из атмосферы в реакции с радикалом OH не были отмечены у других трассеров из химического состава атмосферы и, как видится, они не объясняют краткосрочные колебания концентрации метана. Хотя существует вероятность роста выбросов от сжигания ископаемого топлива, однако устойчивое смещение к обедненным значениям изотопа <sup>13</sup>C и его значительная межгодовая изменчивость, а также увеличение доли метана в тропических областях и Южном полушарии после 2007 года, оба этих факта показывают, что выбросы от сжигания ископаемого топлива не стали главной причиной роста концентрации метана.

Хотя выбросы от ископаемого топлива, в роли части общего бюджета метана, сократились, данные [163] не могут исключить увеличение выбросов в абсолютном выражении, особенно если исходный газ был изотопически сильно обеднен <sup>13</sup>C: однако, на основании как анализа по широтам, так и изотопных ограничений в качестве причины роста метана **был исключён газ Сибири**, а выбросы от других источников ископаемого топлива, таких как китайский уголь, добыча гидроразрывом в США, или большинство сжиженного природного газа, как правило, более обогащены <sup>13</sup>C и, таким образом, также не соответствуют изотопным ограничениям.

Метан – короткоживущий парниковый газ (8 – 12 лет). При этом фокус на снижение выбросов короткоживущих парниковых газов не имеет влияния на долгосрочный тренд изменения климатической системы Земли, определяемый долгоживущими парниковыми газами (CO<sub>2</sub>), поэтому особое внимание к метану является скорее политически мотивированным действием для демонстрации «легких» и быстрых, но виртуальных и безрезультатных «мероприятий» по сокращению выбросов парниковых газов.



**Рисунок 13.3.** Вклад CO<sub>2</sub> и короткоживущих парниковых газов в удержание глобальной температуры

Следует отметить, что согласно 5-му Оценочному докладу МГЭИК:

- не существует единой системы показателей для точного сравнения всех последствий различных выбросов, все метрики имеют ограничения и неопределенности;
- вплоть до 4-го Оценочного доклада МГЭИК Потенциал глобального потепления (GWP) был самым общим метрическим показателем;
- **в настоящее время повышается значение Потенциала изменения глобальной температуры (GTP)**, который основан на изменении средней глобальной приземной температуры в выбранный момент времени, и также по отношению к изменению, вызванному эталонным газом CO<sub>2</sub>;
- меры по ограничению антропогенных выбросов метана в приземный слой с присутствием озона определены как ситуация «обоюдного выигрыша»: могут приводить как к охлаждению, так и потеплению климата.



Сравнение методик по оценке парникового эффекта вещества GWP и GTP приведены на рис. 13.4.



**Рисунок 13.4.** Сравнение методик по оценке парникового эффекта вещества  
 Источник: 5-й оценочный доклад Межгосударственной группы экспертов по изменению климата, 2013

Ключевым показателем является коэффициент пересчета выбросов метана (основного компонента природного газа) в CO<sub>2</sub>-эквивалент.

Согласно руководящим принципам для формирования национальных кадастров утвержденным решением Конференции Сторон Рамочной конвенции об изменении климата № 24/CP.19 в расчетах применяется Потенциал глобального потепления (GWP) для 100-летнего периода. **Для метана указанное значение составляет 25** (коэффициент сравнения с базовым парниковым газом – диоксидом углерода). В 5-ом (последнем) Оценочном докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата (далее – МГЭИК) предлагается увеличить потенциал метана в рамках данной методологии расчета «углеродного следа» до **34**.

От одного доклада МГЭИК к другому постоянно изменялись предлагаемые коэффициенты перевода выбросов метана в CO<sub>2</sub>-эквивалент. Эволюция коэффициентов представлена на рис. 13.5.

Новый Потенциал изменения глобальной температуры основывается на изменении средней глобальной приземной температуры в выбранный момент времени. Другими словами, этот показатель пытается ответить на вопрос: каким будет изменение температуры в году X в ответ на радиационное воздействие определенных выбросов парниковых газов? Проще говоря, **Потенциал изменения глобальной температуры** гораздо лучше подходит для политики целеполагания, которая продвигается в Парижском соглашении по климату.



**Рисунок 13.5.** Методические подходы оценки роли метана в изменении климата

В случае применения показателя **Потенциала изменения глобальной температуры**, метан обладает в **4 – 11 раз** большим эффектом, чем CO<sub>2</sub>, что намного меньше, чем при расчетах в рамках показателя Потенциала глобального потепления (28-34 раза).

В связи со значительной разницей (в 3-7 раз) в оценках влияния метана на климат в методиках МГЭИК, требуются дополнительные исследования климатической системы. Например, часто в работах игнорируются не только естественные причины климатических изменений, но и факторы, компенсирующие естественным путем антропогенное влияние на климат. При росте температуры увеличивается испарение H<sub>2</sub>O, растет облачность, увеличивается альbedo Земли, что компенсирует антропогенное влияние.

Разумный подход к анализу процессов очень важен для решения глобальных экологических проблем [154]. Роль метана в климатической системе необходимо рассматривать вместе с другими естественными и антропогенными процессами [157], стараясь объективно оценить вклад каждого элемента системы.



Рисунок 13.6. Ноосферный баланс «климата»

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

**1.** Влияние антропогенного воздействия на климатическую систему Земли привлекло внимание во второй половине XX века. Превалирующая точка зрения состоит в том, что развитие мирового хозяйства привело к существенному обогащению атмосферы парниковыми газами ( $\text{CO}_2$  и др.), что усиливает парниковый эффект и приводит к потеплению в приповерхностном слое атмосферы и к другим изменениям климата. В период 1880-2012 гг. температура выросла приблизительно на  $0,85^\circ\text{C}$ .

Получила распространение точка зрения, что к концу XXI века ожидается усиление глобального потепления – до нескольких градусов по сравнению с уровнем конца XX века в зависимости от путей развития мирового хозяйства и реализации мер сдерживания глобальных выбросов парниковых газов.

Ряд международных соглашений направлен на решение этой проблемы: Рамочная конвенция ООН по изменению климата, Киотский протокол и Парижское соглашение по климату (2015 год). При этом понятие «глобальное изменение климата» зачастую подменяется понятием «глобальное потепление». Объективная оценка свидетельствует, что изменение климата носит циклический характер и за многовековую историю Земли были периоды потепления и похолодания.

**2.** В абсолютном выражении наиболее важным парниковым газом является  $\text{CO}_2$  по той причине, что рост объемов его глобальной эмиссии намного превосходит рост выбросов других газов. И в уже произошедшем парниковом эффекте, и в возможно ожидаемом в течение XXI века основную роль играет диоксид углерода. Метан имеет меньшее значение, но увеличения его глобальных концентраций заметны. С 1750 по 2011 год основные парниковые газы оказали следующее радиационное воздействие на климатическую систему Земли:  $\text{CO}_2$  -  $1,82 (\pm 0,2) \text{ Вт/м}^2$ ,  $\text{CH}_4$  -  $0,48 \pm 0,05 \text{ Вт/м}^2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  -  $0,17 \pm 0,03 \text{ Вт/м}^2$ . За тот же период времени суммарное радиационное воздействие всех парниковых газов составило  $2,83 (2,54 - 3,12) \text{ Вт/м}^2$ . На долю метана при этом приходится 17%.

**3.** Оценка радиационного форсинга метана (разности балансов солнечной радиации с учетом и без учета какого-либо фактора: естественных – выбросы аэрозолей при извержении вулканов, изменения солнечной активности и т.д. и антропогенных) позволяет сделать следующие наблюдения:

- метан участвует в протекающих в атмосфере фотохимических процессах и тем самым влияет на то, каким будет содержание других компонентов атмосферного воздуха (в том числе – парниковых газов), в то время как углекислый газ фотохимически пассивен в атмосфере;

- это явление приводит к двойному эффекту. Во-первых, содержание метана снижается и, следовательно, снижается его прямой форсинг, но появляется непрямой форсинг, в основном через увеличение влияния паров воды. Учитывая, что концентрация  $H_2O$  в атмосфере практически неизменна, следовательно, непрямой форсинг  $CH_4$  не влияет на итоговую картину, то есть увеличивая количество паров воды разлагающийся  $CH_4$  не ведет к увеличению влияния парниковых газов на климат.

**4.** Наиболее распространённая точка зрения оценивает современный естественный глобальный выброс метана в 347 (238-484) Мт  $CH_4$ /год. Его основные источники: заболоченные территории (63%), различные водные объекты (озера, реки, моря и океаны), пожары, ферментация корма в желудке жвачных животных и насекомых, оттаивающая многолетняя мерзлота, метангидраты, некоторые другие глубинные геологические источники.

С учетом промышленности выбросы метана составляет 558 (540-568) млн т. Изъятие в результате химических процессов в атмосфере 548 (529-555) млн т, то есть разница 10 млн т, что составляет 0,2% от общей массы метана в атмосфере (около 5 трлн т)

**5.** По оценкам экспертов, время жизни метана в атмосфере составляет 8-12 лет. Он безвозвратно расходуется главным образом в реакциях с гидроксидом (в основном в тропосфере) и атомарным хлором (в основном в стратосфере). Такое небольшое, по сравнению с углекислым газом, время жизни  $CH_4$  привлекает в последнее время к нему повышенное внимание при решении проблемы регулирования выбросов парниковых газов. Однако фокус на снижение выбросов короткоживущих парниковых газов (метана) по факту не имеет влияния на долгосрочный тренд изменения климатической системы Земли, определяемый долгоживущими парниковыми газами ( $CO_2$ ), поэтому особое внимание к метану является скорее политически мотивированным действием для демонстрации «легких» и быстрых, но виртуальных и безрезультатных «мероприятий» по сокращению выбросов парниковых газов.

**6.** Анализ динамики изменения концентрации метана в атмосфере показывает, что эмиссия метана примерно равна его изъятию из атмосферы. Данный процесс носит естественный, природный характер и аналогичен естественному регулированию теплового баланса через цикл оборота водяного пара.

**7.** Сравнение методик, рекомендованных Межгосударственной группой экспертов по изменению климата для оценки влияния различных веществ на климатическую систему, демонстрирует отсутствие единой системы

показателей для точного сравнения всех последствий. Оценка роли метана по существующим методикам GWP (Потенциал глобального потепления) и GTP (Потенциал изменения глобальной температуры) отличаются, но, в общем, свидетельствуют о незначительной роли метана в процессе изменения климата. Коэффициент перевода выбросов метана в  $CO_2$ -эквивалент снижается с 28 до 4 при переходе от Потенциала глобального потепления к Потенциалу изменения глобальной температуры, который более релевантен цели Парижского соглашения по климату.

**8.** Анализ углеродного следа показывает, что доля выбросов метана от нефтегазовой отрасли мира составляет 0,1% от глобальных выбросов парниковых газов, в том числе доля газовой отрасли России 0,004%, что позволяет сделать вывод о его незначительном влиянии выбросов метана от нефтегазовой отрасли на климат.

1. Jones P.D., Harpham C. 2013. Estimation of the absolute surface air temperature of the Earth. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 118, 3213–3217, doi:10.1002/jgrd.50359.

2. IPCC, 2014a. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

3. Миланкович М. 1939. Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. Пер. с нем. А.Х. Хргиана под ред. С.Л. Бастамова. – М.: ГОНТИ, – 207 с.

4. Большаков В.А. 2015. Орбитальные факторы долгопериодных колебаний климата плейстоцена. *Фундаментальная и прикладная климатология*. т. 1, с. 49-77.

5. Trenberth K.E., Fasullo J.T., Kiehl J. 2009. Earth's global energy budget. *Bulletin of American Meteorological Society*, p. 311-323.

6. ООН, 1992. Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convru.pdf>

7. Федеральный закон, 1994. «О ратификации рамочной Конвенции ООН об изменении климата», принят 04.11.1994 г. N 34-ФЗ. *Собрание законодательства Российской Федерации от 07.11.1994 г., N 28, ст. 2927.*

8. КС РКИК ООН, 1997. Киотский протокол к РКИК ООН; Конференция сторон РКИК ООН – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kprus.pdf> – Загл. с экрана. – Яз. рус.

9. КС РКИК ООН, 2012 г. Поправка к Киотскому протоколу; Конференция сторон РКИК ООН – Электрон. дан. – Режим доступа: [https://unfccc.int/files/kyoto\\_protocol/application/pdf/kp\\_doha\\_amendment\\_russian.pdf](https://unfccc.int/files/kyoto_protocol/application/pdf/kp_doha_amendment_russian.pdf)

10. Федеральный закон, 2004. «О ратификации Киотского протокола к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата», принят 04.11.2004 N 128-ФЗ. *Собрание законодательства РФ*, 08.11.2004, N 45, ст. 4378.

11. КС РКИК ООН, 2015 г. Парижское соглашение; Конференция сторон РКИК ООН – Электрон. дан. – Режим доступа: [http://unfccc.int/files/essential\\_background/convention/application/pdf/russian\\_paris\\_agreement.pdf](http://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/russian_paris_agreement.pdf)

12. Правительство РФ, 2016а. Распоряжение от 14.04.2016 г. № 670-р – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://government.ru/docs/22726/>

13. Министерство иностранных дел Правительство РФ, 2016. О подписании Российской Федерацией Парижского соглашения, принятого под эгидой Рамочной конвенции ООН об изменении климата/Сообщение для СМИ. -

Электрон. дан. – Режим доступа: [http://www.mid.ru/foreign\\_policy/news/-/asset\\_publisher/cKNonkJE02Bw/content/id/2248604](http://www.mid.ru/foreign_policy/news/-/asset_publisher/cKNonkJE02Bw/content/id/2248604)

14. Правительство РФ, 2016b. План реализации комплекса мер по совершенствованию государственного регулирования выбросов парниковых газов и подготовки к ратификации Парижского соглашения, принятого 12 декабря 2015 г. 21-й сессией Конференции Сторон Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата, утвержден 03.11.2016 г. № 2344-р – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://government.ru/docs/25221/>

15. HLA CCAC, 2014. Framework for the Climate & Clean Air Coalition to Reduce Short-Lived Climate Pollutants/ Положение о деятельности Коалиции в защиту климата и чистого воздуха по борьбе за сокращение загрязнителей атмосферы с непродолжительным сроком жизни – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://ccacoalition.org/en/resources/ccac-framework-document>

16. HLA CCAC, 2016. The Marrakech Communiqué – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://ccacoalition.org/en/resources/marrakech-communiqué>

17. Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.-M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davis M., Delayque G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V.Y., Lorius C., Pepin L., Ritz C., Saltzman E., Stievenard M.. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399, 1999, p. 429-436.

18. CCAC, UNEP, 2014. CCAC Oil and Gas Methane Partnership Framework – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.ccacoalition.org/en/resources/ccac-oil-gas-methane-partnership-framework-document>

19. Jouzel J., Lorius C., Petit J.R., Genthon C., Barkov N.I., Kotlyakov V.M., Petrov V. M. 1987. Vostok ice core: a continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160,000 years). *Nature*, 1987, 329:403-8.

20. Jouzel J., Barkov N.I., Barnola J.M., Bender M., Chappellaz J., Genthon C., Kotlyakov V.M., Lipenkov V., Lorius C., Petit J.R., Raynaud D., Raisbeck G., Ritz C., Sowers T., Stievenard M., Yiou F., Yiou P. 1993. Extending the Vostok ice-core record of palaeoclimate to the penultimate glacial period. *Nature*, 1993, 364:407-12.

21. Jouzel J., Waelbroeck C., Malaize B., Bender M., Petit J. R., Stievenard, M., Barkov N.I., Barnola J.M., King T., Kotlyakov V.M., Lipenkov V., Lorius C., Raynaud D., Ritz C., Sowers T. 1996. Climatic interpretation of the recently extended Vostok ice records. *Climate Dynamics*, 1996, 12:513-521.

22. Barnola J.M., Raynaud D., Lorius C., Barkov N.I. Historical CO<sub>2</sub> record from the Vostok ice core. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A., 2003, <<http://cdiac.esd.ornl.gov/>>



23. Loulergue L., Schilt A., Spahni R., et al. Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH<sub>4</sub> over the past 800,000 years // *Nature*. 2008. V. 453. P. 383–386.

24. Бажин Н.М. Метан в окружающей среде. Аналитический обзор / Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2010. – 56 с. (Сер. Экология. Вып. 93)

25. Etheridge D.M., Steele L.P., Francey R.J., Langenfelds R.L. 2002. Historical CH<sub>4</sub> Records Since About 1000 A.D. From Ice Core Data. U.S. DOE Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge, TN.

26. Etheridge, D.M., Steele L.P., Francey R.J., Langenfelds R.L. 1998. Atmospheric methane between 1000 A.D. and present: Evidence of anthropogenic emissions and climatic variability. *Journal of Geophysical Research* 103:15, 979-15,993.

27. Nisbet E.G., Dlugokencky E.J., Manning M.R., Lowry D., Fisher R.E., France J.L., Michel S.E., Miller J.B., White J.W.C., Vaughn B., Bousquet P., Pyle J.A., Warwick N.J., Cain M., Brownlow R., Zazzeri G., Lanoisellé M., Manning A.C., Gloor E., Worthy D.E.J., Brunke E.-G., Labuschagne C., Wolff E.W., Ganesan A.L. 2016. Rising atmospheric methane: 2007–2014 growth and isotopic shift. *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 30, issue 9, <http://dx.doi.org/10.1002/2016GB005406>

28. Ciais P., Sabine C., Bala G., Bopp L., Brovkin V., Canadell J., Chhabra A., DeFries R., Galloway J., Heimann M., Jones C., Le Quéré C., Myneni R.B., Piao S., Thornton P. 2013. Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

29. Kirschke S., Bousquet P., Ciais P., Saunoy M., Canadell J.G., Dlugokencky E.J., Bergamaschi P., Bergmann D., Blake D.R., Bruhwiler L., Cameron-Smith P., Castaldi S., Chevallier F., Feng L., Fraser A., Heimann M., Hodson E.L., Houweling S., Josse B., Fraser P.J., Krümmel P.B., Lamarque J.F., Langenfelds R.L., Le Quéré C., Naik V., O'Doherty S., Palmer P.I., Pison I., Plummer D., Poulter B., Prinn R.G., Rigby M., Ringeval B., Santini M., Schmidt M., Shindell D.T., Simpson I.J., Spahni R., Steele L.P., Strode S.A., Sudo K., Szopa S., van der Werf G.R., Voulgarakis A., van Weele M., Weiss R.F., Williams J.E., Zeng G. Three decades of global methane sources and sinks // *Nature Geoscience* 2013. V. 6. № 10. P. 813-823.

30. Saunoy M., Bousquet P., Poulter B., Peregón A., Ciais P., Canadell J., Dlugokencky E.J., Etiope G., Bastviken D., Houweling S., Janssens-Maenhout G., Tubiello F.N., Castaldi S., Jackson R.B., Alexe M., Arora V.K., Beerling D.J., Bergamaschi P., Blake D.R., Brailsford G., Brovkin V., Bruhwiler L., Crevoisier C., Crill P., Covey K., Curry C., Frankenberg C., Gedney N., Höglund-Isaksson L.,

Ishizawa M., Ito A., Joos F., Kim H.-S., Kleinen T., Krümmel P., Lamarque J.-F., Langenfelds R., Locatelli R., Machida T., Maksyutov S., McDonald K.C., Marshall J., Melton J.R., Morino I., Naik V., O'Doherty S., Parmentier F.-J.W., Patra P.K., Peng C., Peng S., Peters G.P., Pison I., Prigent C., Prinn R., Ramonet M., Riley W.J., Saito M., Santini M., Schroeder R., Simpson I.J., Spahni R., Steele P., Takizawa A., Thornton B.F., Tian H., Tohjima Y., Viovy N., Voulgarakis A., van Weele M., van der Werf G.R., Weiss R., Wiedinmyer C., Wilton D.J., Wiltshire A., Worthy D., Wunch D., Xu X., Yoshida Y., Zhang B., Zhang Z., and Zhu Q.: The global methane budget 2000–2012, *Earth Syst. Sci. Data*, 8, 697-751, <https://doi.org/10.5194/essd-8-697-2016>, 2016.

31. Кароль И.Л., Киселев А.А. Атмосферный метан и глобальный климат // *Природа*. 2004. № 7. С. 47-52.

32. Бажин Н.М. 2000. Метан в атмосфере. *Соросовский образовательный журнал*, т. 6, № 3, с. 52-57.

33. EPA, 2010. Methane and Nitrous Oxide Emissions from Natural Sources, Anderson B., Bartlett K., Frolking S., Hayhoe K., Jenkins J. and Salas US EPA, 2010, - 194 pp.

34. EPA, 2012. Global Mitigation of Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gases US EPA, 2013, – 410 pp.

35. IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwicker and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA; 2014, -1419 pp.

36. Stern D.I., Kaufmann R.K. 1998. Annual Estimates of Global Anthropogenic Methane Emissions: 1860-1994. Trends Online: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.

37. Т.Ф. Стоккер, Д. Цинь, Дж.-К. Платтнер, Л. В. Александер, С. К. Аллен, Н. Л. Биндофф, Ф.-М. Бреон, Дж. А. Черч, У. Кубаш, С. Эмори, П. Форстер, П. Фридрихштайн, Н. Жиллетт, Дж.М. Грегори, Д.Л. Хартманн, Э. Янсен, Б. Киртман, Р. Кнутти, К. Кришна Кумар, П. Лемке, И. Мароцке, В. Массон-Дельмотт, Дж. А. Михль, И.И. Мохов, Ш. Пьяо, В. Рамасвами, Д. Рэндалл, М. Рейн, М. Рохас, К. Сабин, Д. Шиндел, Л.Д. Толлей, Д.Г. Воан, Ш.-П. Се, 2013 г.: Техническое резюме. Содержится в публикации «Изменение климата, 2013 г.: Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы I в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата» [Т.Ф. Стокер, Д. Цинь, Дж.-К. Платтнер, М. Тигнор, С.К. Аллен, Дж. Бошунг, А. Науэлс, Ю. Ся, В. Бекс и П. М. Мидглей (редакторы)]. Кембридж юниверсити



пресс, Кембридж, Соединенное Королевство, и Нью-Йорк, США.

38. U.S. Standard Atmosphere, 1976. /National Aeronautics and Space Administration. No. 77-16482. — Washington D.C., U.S. Government Printing Office, 1976, 241 p.

39. Special Report on Emission Scenarios (N. Nakicenović et al.). A Special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2000, 599 pp.

40. Дзюба А.В., Елисеев А.В., Мохов И.И. Оценка изменений скорости стока метана из атмосферы при потеплении климата. Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2012, том 48, № 3, с. 372–382.

41. Киселев А.А., Решетников А.И. Метан в российской Арктике: результаты наблюдений и расчетов. Проблемы Арктики и Антарктики, 2013, № 2 (96), с. 5 – 15.

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

43. Kiselev A.A., Karol I.L. The ratio between nitrogen oxides and carbon monoxide total emissions as precursors of tropospheric hydroxyl content evolution // Atmospheric Environment. 2002. Vol. 36. P. 5971–5981.

44. Tijani Y. A. Multi-annual Study of Chlorine Species in the Stratosphere using Airborne Microwave Measurements. Institute of Environmental Physics University of Bremen, Germany, 2004, 97 p.

45. Prather M.J., Holmes C.D., Hsu J. Reactive greenhouse gas scenarios: Systematic exploration of uncertainties and the role of atmospheric chemistry // Geophysical Research Letters. 2012. Vol. 39. L09803. doi:10.1029/2012GL051440.

46. Voulgarakis A., Naik V., Lamarque J.F., Shindell D.T., Young P., Prather M.J., Wild O., Field R., Sudo K., Szopa S., Zeng G. 2013 Analysis of present day and future OH and methane lifetime in the ACCMIP simulations // Atmospheric Chemistry and Physics. 2013. Vol. 13. P. 2563–2587. doi: 10.5194/acp-13-2563-2013.

47. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. СПб, Гидрометеоиздат, 2000, 778.

48. Семенов С.М., Попов И.О. Сравнительные оценки влияния изменения концентраций диоксида углерода, метана, закиси азота и водяного пара на радиационно-равновесную температуру земной поверхности. Метеорология и гидрология. 2011, N 8, с. 34 – 43.

49. Семенов С.М. 2012. Парниковый эффект и его антропогенное усиление. Солнечно-земная физика. Вып. 21 (2012), с. 10–17.

50. Семенов С.М. Парниковый эффект: открытие, развитие концепции, роль в формировании глобального климата и его антропогенных изменений. Фундаментальная и прикладная климатология. 2015, т. 2, с. 103 – 126.

51. The HITRAN molecular spectroscopic database and HAWKS (HITRAN

Atmospheric Workstation): 1996 edition. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. 1998. V. 60. N 5. P. 665-710.

52. Prinn R.G., Weiss R.F., Fraser P.J., Simmonds P.G., Cunnold D.M., Aleya F.N., O'Doherty S., Salameh P., Miller B.R., Huang J., Wang R.H.J., Hartley D.E., Harth C., Steele L.P., Sturrock G., Midgley P.M., McCulloch A. (2000, A history of chemically and radiatively important gases in air deduced from ALE/GAGE/AGAGE, J. Geophys. Res., 105(D14), 17751-17792. Website: <http://agage.mit.edu>.

53. 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 [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013, - 1535 pp.

54. Башмаков И.А., Мышак А.Д. Факторы, определяющие выбросы парниковых газов в секторе «Энергетика» России: 1990-2050. Часть 2: прогнозы на 2010-2060 годы. Центр по эффективному использованию энергии (ЦЭНЭФ). Москва, 2013

55. Kirtman, B., S.B. Power, J.A. Adedoyin, G.J. Boer, R. Bojariu, I. Camilloni, F.J. Doblas-Reyes, A.M. Fiore, M. Kimoto, G.A. Meehl, M. Prather, A. Sarr, C. Schär, R. Sutton, G.J. van Oldenborgh, G. Vecchi and H.J. Wang, 2013: Near-term Climate Change: Projections and Predictability. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

56. Houghton J.T., Jenkins G.J., Ephraums J.J., eds. Climate change: The IPCC Scientific Assessment. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

57. Mueller B., Bartsch U. The Modelling of Anthropogenic Methane Emissions: Methodology and Estimates. Oxford Institute for Energy Studies. EV29. ISBN 1901795144. 1999.

58. EPA, 2012. Summary report: Global anthropogenic Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gas Emissions: 1990-2030. Office of Atmospheric Programs Climate Change Division U.S. Environmental Protection Agency 1200 Pennsylvania Avenue, NW Washington, DC 20460, 2012. -188 pp.

59. Луговой О., Поташников В., Гордеев Ж. Прогнозы энергобаланса и выбросов парниковых газов на модели RU-TIMES до 2050 года. Научный вестник ИЭП им. Гайдара. 2014. №5. с. 39-43.

60. IPCC, 2000. Special Report on Emissions Scenarios: A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change,

Nakićenović N.; Swart, R., eds. Cambridge University Press.

61. Leggett J., Pepper W.J., Swart R.J., Edmonds J., Meira Filho L.G., Mintzer I., Wang M.X., and Watson J. 1992. «Emissions Scenarios for the IPCC: an Update», *Climate Change 1992: The Supplementary Report to The IPCC Scientific Assessment*, Cambridge University Press, UK, pp. 68-95.

62. Pepper W.J., Leggett R.J., Swart R.J., Wasson J., Edmonds J., Mintzer I. 1992. «Emission Scenarios for the IPCC An Update, Assumptions, Methodology, and Results», US Environmental Protection Agency, Washington, D.C.

63. IPCC, 1992. IPCC First Assessment Report Overview and Policymaker Summaries and 1992 IPCC Supplement. Published with the support of Australia, Canada, Germany, The Netherlands, Spain, United States of America, Austria, France, Japan, Norway and United Kingdom. Printed in Canada, 178 pp.

64. IPCC, 1995. *Climate Change 1995: IPCC Second Assessment Report*. 63 p.

65. Weyant J., Azar Ch., Kainuma M., Kejun J., Nakicenovic N., Shukla P.R., La Rovere E., Yohe G. 2009. Report of 2.6 Versus 2.9 Watts/m<sup>2</sup> RCPP Evaluation Panel. Geneva, Switzerland: IPCC Secretariat, 2009.

66. IPCC, 2001a. Technical Summary of the Working Group I Report. Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. Cambridge University Press, 2001, 83 pp.

67. Clarke L., Edmonds J., Krey V., Richels R., Rose S., Tavoni M. 2010. International climate policy architectures: overview of the EMF 22 international scenarios. *Energ Econ* 31(suppl 2): S64–S81.

68. van Vuuren D.P., Edmonds J., Kainuma M., Riahi K., Thomson A., Hibbard K., Hurtt G.C., Kram T., Krey V., Lamarque J.-F., Masui T., Meinshausen M., Nakicenovic N., Smith S.J., Rose S.K. 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* (2011) 109:5–31. DOI 10.1007/s10584-011-0148-z

69. IPCC, 2001. *Climate Change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*. (Houghton J. T., Ding Y., Griggs D. J., et al., editors). Cambridge University Press, 2001, 881 pp.

70. Myhre G., Shindell D., Bréon F.-M., Collins W., Fuglestedt J., Huang J., Koch D., Lamarque J.-F., Lee D., Mendoza B., Nakajima T., Robock A., Stephens G., Takemura T., Zhang H. 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

71. Shine K., Fuglestedt J., Hailemariam K., Stuber N. 2005. Alternatives

to the global warming potential for comparing climate impacts of emissions of greenhouse gases. *Clim. Change*, 68, 281–302.

72. Shine K., Berntsen T., Fuglestedt J., Skeie R., Stuber N. 2007. Comparing the climate effect of emissions of short- and long-lived climate agents. *Phil. Trans. R. Soc. A* (2007) 365, 1903–1914, doi:10.1098/rsta.2007.2050

73. Berntsen T. and J. Fuglestedt, 2008: Global temperature responses to current emissions from the transport sectors. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 105, 19154–19159.

74. Peters G.P., B. Aamaas, M.T. Lund, C. Solli and J.S. Fuglestedt, 2011b: Alternative «Global Warming» metrics in life cycle assessment: A case study with existing transportation data. *Environ. Sci. Technol.*, 45, 8633–8641.

75. Shindell D., Faluvegi G., Walsh M., Anenberg S.C., van Dingenen R., Muller N.Z., Austin J., Koch D., Milly G. 2011. Climate, health, agricultural and economic impacts of tighter vehicle-emission standards. *Nature Climate Change*, 1, 59-66, doi:10.1038/nclimate1066.

76. Dlugokencky, E., Myers R.C., Lang P.M., Masarie K.A., Crotwell A.M., Thoning K.W., Hall B.D., Elkins J.W., Steele L.P. 2005. Conversion of NOAA atmospheric dry air CH<sub>4</sub> mole fractions to a gravimetrically prepared standard scale. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 110, doi:10.1029/2005JD006035.

77. Hartmann D.L., Klein Tank A.M.G., Rusticucci M., Alexander L.V., Brönnimann S., Charabi Y., Dentener F.J., Dlugokencky E.J., Easterling D.R., Kaplan A., Soden B.J., Thorne P.W., Wild M., Zhai P.M. 2013. Observations: Atmosphere and Surface. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

78. Meinshausen M., Raper S., Wigley T. 2011. Emulating coupled atmosphere-ocean and carbon cycle models with a simpler model, MAGICC6–Part 1: Model description and calibration. *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 1417–1456.

79. Collins M., Knutti R., Arblaster J., Dufresne J.-L., Fichefet T., Friedlingstein P., Gao X., Gutowski W.J., Johns T., Krinner G., Shongwe M., Tebaldi C., Weaver A. J., Wehner M. 2013. Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

80. IPCC, 2007: *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on*

Climate Change, B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds), Cambridge University, Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., 2007, - 841 pp.

81. GMI, 2015. Global Methane Emissions and Mitigation Opportunities, 2015; Global Methane Initiative – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.globalmethane.org/documents/gmi-mitigation-factsheet.pdf> – Загл. с экрана. – Яз. англ.

82. Prinn R.G., Weiss R.F., Krummel P.B., O'Doherty S., Fraser P.J., Muhle J., Reimann S., Vollmer M.K., Simmonds P.G., Maione M., Arduini J., Lunder C.R., Schmidbauer N., Young D., Wang H.J., Huang J., Rigby M., Harth C.M., Salameh P.K., Spain T.G., Steele L.P., Arnold T., Kim J., Hermansen O., Derek N., Mitrevski B., Langenfelds R. 2016, The ALE / GAGE AGAGE Network, Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC), Oak Ridge National Laboratory (ORNL), U.S. Department of Energy (DOE).

83. Global Methane Initiative (GMI), Climate and Clean Air Coalition (CCAC), World Resource Institute (WRI), United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), US EPA Natural Gas STAR Program (Natural Gas STAR).

84. Climate Change: The IPCC Scientific Assessment (1990), Ch. 2. [http://www.ipcc.ch/ipccreports/far/wg1/ipcc\\_far\\_wg1\\_chapter\\_02.pdf](http://www.ipcc.ch/ipccreports/far/wg1/ipcc_far_wg1_chapter_02.pdf)

85. Отчет Межправительственной группы Экспертов по Изменениям Климата, 2007 // [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr\\_ru.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_ru.pdf).

86. Отчет Межправительственной группы Экспертов по Изменениям Климата, 2013 // <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>

87. Fiore A.M., Naik V., Leibensperger E.M. Air quality and climate connections. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2015, v. 65, No. 6, pp. 645-685. Doi: 10.1080/10962247.2015.1040526

88. [http://www.ldeo.columbia.edu/~amfiore/publications/Fiore\\_Naik\\_Leibensperger\\_ClimAQ\\_CR\\_AWMA\\_2015\\_wSupplInfo.pdf](http://www.ldeo.columbia.edu/~amfiore/publications/Fiore_Naik_Leibensperger_ClimAQ_CR_AWMA_2015_wSupplInfo.pdf)

89. Etminan M., Myhre G., Highwood E.J., Shine K.P. Radiative forcing of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide: A significant revision of the methane radiative forcing. *Geophysical Research Letters*, 2016, v. 43, pp. 12614-12623.

90. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 1. С. 226–244

91. <http://naukarus.com/modelirovanie-radiatsionnogo-forsinga-fonovogo-aerozolya-s-ispolzovaniem-dannyh-izmereniy>

92. Гинзбург А.С., Губанова Д.П., Минашкин В.М. Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат // *Рос. хим. ж.* 2008. Т. LII. № 5. С. 112–119

93. Гинзбург А.С., Мельникова И.Н., Самуленков Д.А., Сапунов М.В., Катковский Л.В. Простая оптическая модель безоблачной и облачной атмос-

феры для расчета потоков солнечной радиации // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2016. Т. 13. № 2. С. 175–192

94. Васильев А.В., Мельникова И.Н. Коротковолновое солнечное излучение в атмосфере Земли. Расчеты. Интерпретация. Измерения. СПб: НИИХ СПбГУ, 2002. 388 с.

95. Melnikova I., Vasilyev A., Samulenkov D., Sapunov M., Tagaev V. The Correction for Multiple Scattering of the Lidar Retrieving in Thin Clouds. *Proceedings of IRS'2016, Auckland, New Zealand* (in print)

96. [http://www.ntv.ru/novosti/1995984/?utm\\_referrer=https%3A%2F%2Fzen.yandex.com](http://www.ntv.ru/novosti/1995984/?utm_referrer=https%3A%2F%2Fzen.yandex.com)

97. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Минимум\\_Маундера](https://ru.wikipedia.org/wiki/Минимум_Маундера)

98. <http://sciencenordic.com/greenland%E2%80%99s-recent-temperature-drop-does-not-disprove-global-warming>

99. <http://sciencenordic.com/greenland%E2%80%99s-recent-temperature-drop-does-not-disprove-global-warming>

100. [https://newzvr.ru/news/science/08-11-2017/k-solntsu-drugim-bokom-rossiyskiy-uchenyy-ob-yasnil-pochemu-menyetsya-klimat-zemli?utm\\_referrer=https%3A%2F%2Fzen.yandex.com](https://newzvr.ru/news/science/08-11-2017/k-solntsu-drugim-bokom-rossiyskiy-uchenyy-ob-yasnil-pochemu-menyetsya-klimat-zemli?utm_referrer=https%3A%2F%2Fzen.yandex.com)

101. [https://easily.com/ru/news/2017/05/30/akademik-ran-uragan-v-moskve-priznak-perehoda-k-holodnomu-ciklu-v-35-let?utm\\_referrer=https%3A%2F%2Fzen.yandex.com](https://easily.com/ru/news/2017/05/30/akademik-ran-uragan-v-moskve-priznak-perehoda-k-holodnomu-ciklu-v-35-let?utm_referrer=https%3A%2F%2Fzen.yandex.com)

102. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Межледниковье#/media/File:Ice\\_Age\\_Temperature.png](https://ru.wikipedia.org/wiki/Межледниковье#/media/File:Ice_Age_Temperature.png)

103. <http://regnum.ru/news/innovatio/2139494.html>.

104. <http://3rm.info/main/70228-globalnoe-zatemnenie-groznoe-predznamenovanie-pochemu-i-kuda-delos-solnce.html>

105. Бялко А.В. Наша планета — Земля. — М.: «Наука», 1983. — С. 192 — 199. — 208 с.

106. [https://en.wikipedia.org/wiki/Milankovitch\\_cycles](https://en.wikipedia.org/wiki/Milankovitch_cycles)

107. Donald Rapp. *Ice Ages and Interglacials: Measurements, Interpretation and Models.* Springer, 2009. ISBN 978-3-540-89679-1

108. Hacked climate emails: conspiracy or tempest in a teapot? *Christian Science Monitor* NOVEMBER 21, 2009

109. <https://www.theatlantic.com/technology/archive/2013/05/the-hockey-stick-the-most-controversial-chart-in-science-explained/275753/>

110. С.А. Рогинко. 15 лет без потепления (с чем будет бороться Парижское соглашение?). *Экологический вестник России* №2, 2017

111. <https://www.sovsekretno.ru/articles/id/5630>

112. [https://www.americanthinker.com/articles/2011/11/scientists\\_in\\_revolt\\_against\\_global\\_warming.html](https://www.americanthinker.com/articles/2011/11/scientists_in_revolt_against_global_warming.html)

113. IPCC, 2014d: Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Groups I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
114. Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation (SRREN). Абу-Даби, 2011. 247 с.
115. Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX). Кампала, 2011. 32 с.
116. Jin Li, Qihui Lu, and Peihua Fu. Carbon Footprint Management of Road Freight Transport under the Carbon Emission Trading Mechanism. *Mathematical Problems in Engineering*, Volume 2015 (2015), Article ID 814527, 13 p.
117. Roger A. Sedjo, Xiaohui Tian. An Investigation of the Carbon Neutrality of Wood Bioenergy. DOI: 10.4236/jep.2012.39114
118. Kristen D. Balinski, Katie Grantham. Quantifying the Carbon Footprint of Lean Waste: <http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx>
119. Measuring the carbon footprint of business processes: <http://eprints.qut.edu.au/80717/>
120. Pilar Cordero. Carbon footprint estimation for a sustainable improvement of supply chains: state of the art. *Journal of Industrial Engineering and Management*: <http://www.jiem.org/index.php/jiem/article/view/570/491>
121. Источник иллюстрации <http://www.dbi-gut.de/emissionen.htm>
122. Европейский институт климата и энергетики: <http://ru.knowledgr.com>
123. Кристина Нуньес. Switch to Natural Gas Won't Reduce Carbon Emissions Much, Study Finds, *National Geographic*: <http://news.nationalgeographic.com/news/energy/2014/09/140924-natural-gas-impact-on-emissions/>
124. Richard Wood и Christopher J. Dey. Australia's carbon footprint: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09535310903541397>
125. Gobinda Chowdhury. Carbon footprint of the knowledge sector: what's the future? <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/00220411011087878>
126. Oyenike Mary Eludoyin. The Challenge of Reducing Food Carbon Footprint in a Developing Country. *Journal of Climatology & Weather Forecasting*: <https://www.omicsonline.org/open-access/the-challenge-of-reducing-food-carbon-footprint-in-a-developing-country-2332-2594-1000124.php?aid=47894>
127. Mario Schmidt. Carbon accounting and carbon footprint – more than just diced results? *International Journal of Climate Change Strategies and Management*: <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/17568690910934372>
128. Tao Gao Qing Liu Jianping Wang. A comparative study of carbon footprint and assessment standards, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, Volume 9, Issue 3, 1 September 2014, Pages 237–243.
129. Крис У. Байнард, Роберт У. Шупп, Пингинг Чжан, Пол Фадил.

A Geospatial Approach to Measuring Surface Disturbance Related to Oil and Gas Activities in West Florida, USA. *Advances in Remote Sensing*, Vol.3 No.2, June, 2014.

130. Final Presentation. DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH. Carbon footprint of natural gas consumed in central eu result comparison – units converted, 2016. 22 p.
131. Ministry of Energy Russia. State report of energy saving and improving of energy efficiency in Russian Federation 2015, 2016. [Online]. Available: <http://minenergo.gov.ru/system/download-pdf/5197/66062>.
132. Russian Federal State Statistic Service, „Form 2-TP (air). For information on air quality. [Online]. Available: <http://bryansk.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat/bryansk/ru/reporting/estatemnts/templates/6f0f41004e77a49d8dedadcdf892b611> [Zugriff am 08.12.2016].
133. Ministry of natural resources and environment of the Russian federation, „The Federal Supervisory Natural Resources Management Service, [Online]. Available: <https://www.mnr.gov.ru/english/fsnrms.php>. [Zugriff am 08.12.2016]
134. Russian Federation Federal State Statistics Service, «Бюллетени об охране окружающей среды (электронные версии) (Bulletins Environmental Protection (electronic version))», Сведения об охране атмосферного воздуха 2015 год (размещено 22.04.2016) (Information on air quality in 2015 (available 22.4.2016))
135. Ukrtransgaz, Modernisation and Reconstruction of Urengoy-Pomary-Uzhgorod Gas Pipeline, [Online]. [https://www.energycommunity.org/portal/page/portal/ENC\\_HOME/DOCS/3398175/0633975ADD357B9CE053C](https://www.energycommunity.org/portal/page/portal/ENC_HOME/DOCS/3398175/0633975ADD357B9CE053C)
136. IEA Natural Gas Information Statistics, World - Natural Gas imports by origin
137. IEA, 2016. [Online]. Available: <https://www.iea.org/gtf/>. [Zugriff am 7 September 2016].
138. Norwegian Environment Agency, Statistics Norway, Norwegian Institute of Bioeconomy Research, Greenhouse Gas Emissions 1990-2014, National Inventory Report. The Norwegian Environment Agency, Oslo, 2016
139. Norwegian Oil and Gas Association, Answer to questionnaire for gas transport and gas production in Norway prepared by DBI, 2016
140. Norwegian Environment Agency, Statistics Norway, Norwegian Forest and Landscape Institute, Greenhouse Gas Emissions 1990-2012, National Inventory Report, The Norwegian Environment Agency, Oslo, 2014
141. Europoigaz, [Online]. Available: <http://www.europoigaz.com.pl/10-przetargi/24-zapraszamydo-zapoznania-sie-z-informacjami-na-temat-przetargow>. [Zugriff am 20.08.2016]
142. VGE Verlag GmbH, European Gas Pipeline System, Essen, 2009.



143. FINAL REPORT Critical Evaluation of Default Values for the GHG Emissions of the Natural Gas Supply Chain, 2016. 102 p.
144. Стефани Болдуин. Углеродный след при производстве электроэнергии. Парламентское управление по науке и технологии: [www.parliament.uk/post](http://www.parliament.uk/post)
145. Углеродный след автомобиля [Электронный ресурс]: <http://www.greenworld365.com/ru/topic/carbon-footprint/>
146. Отказ от мяса уменьшает углеродный след сильнее, чем отказ от автомобиля: [https://rodovid.me/environment\\_protection/otkaz-ot-myasa-umen-shaet-uglerodnyy-sled-silnee-chem-otkaz-ot-avtomobilya.html](https://rodovid.me/environment_protection/otkaz-ot-myasa-umen-shaet-uglerodnyy-sled-silnee-chem-otkaz-ot-avtomobilya.html)
147. Grachev V.A. Production of High Quality Cast Iron in a Gas Cupola Furnace. International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 11, Number 22 (2016) pp. 10849-10856 © Research India Publications: <http://www.ripublication.com>
148. Бажин Н.М. Метан в атмосфере. Соросовский образовательный журнал. Том 6, №3, 2000. с. 52 – 57.
149. Warneck P. Chemistry of the Natural Atmosphere. N.Y.: Acad. Press, 1988.
150. Daniele Fanelli, «Meat Is Murder on the Environment», New Scientist 18 Jul. 2007.
151. Crutzen P.J. Geophysiology of Amazonia / Ed. R.E. Dickenson. N.Y.: Wiley, 1987. P.107 – 130.
152. Грачев В.А. Учение В.И. Вернадского как основа устойчивого развития. Юг России: экология, развитие. Том 10, №3, 2015.
153. Метановая дрожь. <http://bellona.ru/2017/04/05/metan-tundra/>
154. Grachev V.A. Noospheric Worldview And Sustainable Development. European Journal of Science and Theology, Vol.11 №1, February 2015.
155. Статья «Антропогенная деятельность человека». <http://ru-ecology.info/term/22805/>
156. Ясаманов Н.А. Метан и климат. Экология и жизнь, №5, 2003.
157. European commission dg ener. Study on actual GHG data for diesel, petrol, kerosene and natural gas. Final report work order: ener/c2/2013-643, july 2015.549
158. IPCC, 2014a: Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)] IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.
159. IPCC, 2013: Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Groups I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker T.F., D. Qin, G.K. Plattner (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1535 p.
160. IPCC, 2014b: Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B:

Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1132 p.

161. IPCC, 2014c: Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [V.R. Barros, C.B. Field, D.J. Dokken (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. P. 668.

162. IPCC, 2014d: Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Groups I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

163. Нисбет Е.Дж., Длугокенцки Е.Ж., Мэннинг М.Р., Лоури Д., Фишер Р.Е., Франс Ж.Л., Мишель С.Е., Миллер Ж.Б., Уайт Ж.У.С., Вон Б., Буске П., Пайл Ж.А., Уорвик Н.Ж., Кейн М., Браунлоу Р., Заззери Г., Ланоисей М., Мэннинг А.С., Гло Е., Уорфи Д.Е.Ж., Бринке Е.-Г., Лабушань С., Вольф Е.У., Гансян А.Л. Глобальные биогеохимические циклы увеличения содержания метана в атмосфере: рост в 2007 – 2014 гг. и изотопное смещение. Лондонский университет, Центр океанологии и наук об атмосфере (Великобритания), Национальное управление океанических и атмосферных исследований, Институт арктических и альпийских исследований (США), Университет Веллингтона (Новая Зеландия), Лаборатория наук о климате и окружающей среде (Франция), Метеослужба Южной Африки (Южная Африка), 2015. 33 с.

164. Feldman D.R. et al. Nature Geosince, 2018 <http://nplus1.ru>

165. О.В. Фаворский «Самая выгодная энергетика в России будет на газе», В мире науки, ноябрь 2017. 111 с.



ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

УДК  
ББК

## РОЛЬ МЕТАНА В ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА

Подписано в печать \_\_\_\_\_  
Формат 60x84 1/16. Усл.печ.л. \_\_\_\_\_.

ISBN

- © НИИПЭ, 2018
- © Неправительственный экологический фонд имени В.И. Вернадского, 2018
- © Российская экологическая академия, 2018