

С.М. Семенов
И.Л. Говор
Н.Е. Уварова

**Роль метана
в современном изменении климата**

Москва, 2018

РОЛЬ МЕТАНА В СОВРЕМЕННОМ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА

С.М. Семенов, И.Л. Говор, Н.Е. Уварова

Москва, 2018

УДК 551.583:547.211<<312>>

ISBN 978-5-9631-0687-7

Данная работа выполнена по запросу «Научно-исследовательского института проблем экологии» (НИИПЭ). Публикуется по рекомендации Ученого совета ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН» при поддержке Секции глобальных экологических проблем Российской экологической академии.

Рецензенты:

доктор географических наук О.А. Анисимов

доктор физико-математических наук А.Г. Рябошапко

Семенов С.М., Говор И.Л., Уварова Н.Е. Роль метана в современном изменении климата. Москва, 2018, 106 с.

Метан является одним из основных парниковых газов. Рост его содержания в атмосфере в индустриальную эру, наряду с обогащением атмосферы другими парниковыми газами, способствовал современному парниковому потеплению климата. В работе описываются естественные и антропогенные источники метана, его исторические и современные концентрации в атмосфере, механизм усиления парникового эффекта при росте концентраций, возможные сценарии изменения глобальных выбросов и глобальных концентраций метана во времени, возможности сокращения его антропогенных выбросов в атмосферу. Информация, представленная в этой книге, основана на научных публикациях, а также собственных разработках авторов.

© Семенов С. М., Говор И. Л., Уварова Н. Е. 2018

Semenov S. M., Govor I. L., Uvarova N. E. The role of methane in the modern climate change. Moscow, 2018, 106 pp.

Methane is one of the main greenhouse gases. A rise in its burden in the atmosphere over the industrial era, along with the enrichment of the atmosphere with other greenhouse gases, has caused the modern greenhouse climate warming. Natural and anthropogenic sources of methane, its historical and present-day concentrations in the atmosphere, the process of enhancement of the greenhouse effect due to an increase in concentration, possible scenarios of changes in global emissions and concentrations of methane over time, as well as opportunities for reduction of anthropogenic emissions to the atmosphere are considered. The information presented in the book is based on scientific publications as well as on the own research results of the authors.

© Semenov S. M., Govor I. L., Uvarova N. E. 2018

СОДЕРЖАНИЕ

1. Парниковые газы и климат Земли	4
2. Международные нормативные документы, регулирующие выбросы парниковых газов.....	8
3. Ретроспектива концентраций метана в атмосфере.....	15
4. Глобальный бюджет метана в атмосфере	19
4.1. Основные источники метана	25
4.1.1. Естественные источники.....	27
4.1.2. Антропогенные источники	30
4.2. Сток метана	34
4.3. Сводные данные о современном бюджете метана	34
5. Оценка «времени жизни» метана в атмосфере и факторы, его определяющие	36
6. Механизм влияния метана на климат	40
6.1. Основы	40
6.2. Оценка современной концентрации метана в атмосфере и ее изменений в индустриальную эру	50
6.3. Существующие подходы к моделированию и прогнозу эмиссии и концентраций метана.....	57
6.4. Сценарии изменения эмиссии и концентраций метана	63
7. Показатели, оценивающие влияние метана на интенсивность парникового эффекта	71
7.1. Потенциал глобального потепления	71
7.2. Потенциал изменения глобальной температуры.....	75
8. Климатическая роль антропогенных выбросов метана по сравнению с другими парниковыми газами	78
9. Возможности сокращения выбросов метана в атмосферу от антропогенных источников	82
10. Заключение	91
Список литературы.....	94

1. Парниковые газы и климат Земли

В последние десятилетия (1981-2010 гг.) среднегодовая глобальная приповерхностная температура составляла около 14°C или 287K (Jones, Harpham, 2013). 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 на исторических временах, так и в новейшее время. В период 1880-2012 гг. она выросла на 0,85 градуса (IPCC, 2014a). В чем же причина этих изменений?

Известно, что основным источником энергии на Земле является Солнце, и изменения потока солнечной энергии, приходящего к Земле, оказывают влияние на ее термический режим.

Существуют естественные факторы, которые всегда оказывали влияние на поток солнечной энергии, поступающий на верхнюю границу атмосферы. Это – астрономические орбитальные факторы: форма и положение земной орбиты меняется; положение земной оси относительно плоскости земной орбиты меняется. Такие изменения являются циклическими и ненаправленными. Согласно теории Миланковича (Миланкович, 1939) такие изменения приводят к циклическим же изменениям потока солнечного излучения, поступающего к нашей планете, что и является причиной циклических изменений земного климата (в том числе оледенений). Несмотря на некоторые серьезные возражения (Большаков, 2015), эта теория в настоящее время является доминирующей. При этом типичный временной масштаб таких явлений – десятки и сотни тысяч лет, и на протяжении жизни одного поколения людей их последствия на Земле не заметны.

Помимо них, существуют и весьма короткопериодные колебания потока солнечного излучения, вызванные циклическими изменениями самой светимости Солнца. Например, существует 11-летний цикл (цикл Швабе). Этот процесс сказывается на приповерхностной температуре Земли, но крайне незначительно, поскольку колебания светимости Солнца в 11-летнем цикле составляют все-

го около 0,1% от его многолетнего среднего значения. Соответствующие изменения приповерхностной температуры Земли – около 0,07°C или меньше.

Однако, существуют и иные причины изменения земного климата, не связанные с изменением потока солнечной энергии, приходящего к Земле, а связанные с изменениями свойств атмосферы и земной поверхности. Другими словами, складывающийся термический режим зависит не только от того, насколько интенсивно светят на предмет, но и от свойств этого предмета.

Это можно проиллюстрировать 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⁻² (Trenberth, Fasullo, Kiehl, 2009). В состоянии термодинамического равновесия земная поверхность излучала бы столько же. Таким образом, согласно закону Стефана-Больцмана, температура земной поверхности была бы 287 х (341,3/396)^{0,25} = 277 К, что на 10 градусов меньше современной.

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 некоторыми газами и частично перенаправляется обратно к земной поверхности (парниковый эффект).

Заметим, что доминирующие составляющие атмосферного воздуха – азот, кислород, аргон – в последнем процессе не участвуют, поскольку с инфракрасным излучением практически не взаимодействуют. Это взаимодействие обеспечивают газовые составляющие, присутствующие в атмосфере в несравненно меньших количествах – водяной пар (H₂O), углекислый газ (CO₂), метан (CH₄), закись азота (N₂O), озон (O₃), перфторуглероды, гидрофторуглероды, гексафторид серы и другие. В соответствии с производимым эффектом,

такие газы получили название парниковых. Помимо парниковых газов с инфракрасным излучением взаимодействуют также некоторые аэрозоли (например, сажевые).

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 незначителен). 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. (IPCC, 2014a). 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.

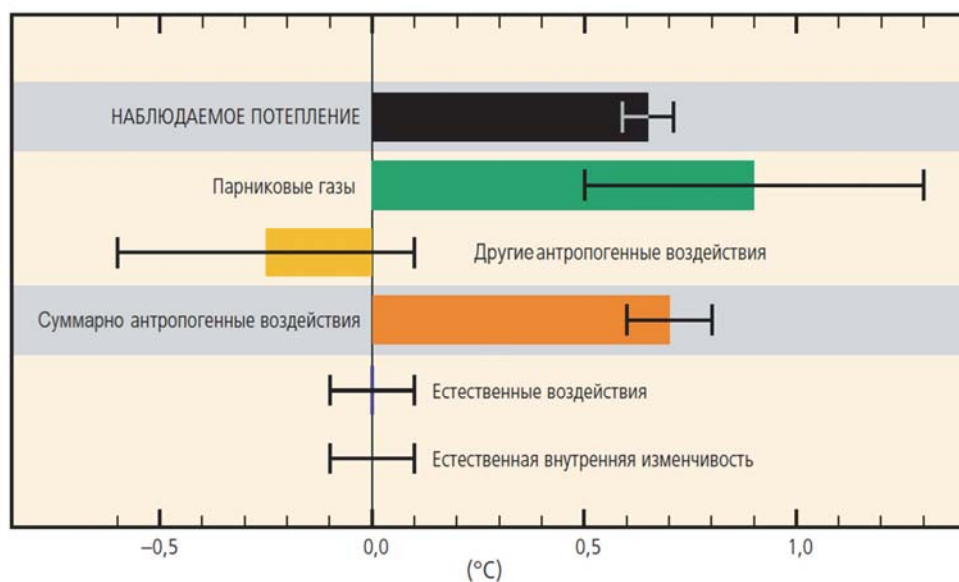


Рисунок 1.1 - Вероятностные границы (горизонтальные интервалы) и средние значения (цветные прямоугольники) оценок установленного вклада разных факторов в линейный тренд наблюдавшегося глобального потепления в 1951-2010 гг. (IPCC, 2014a).

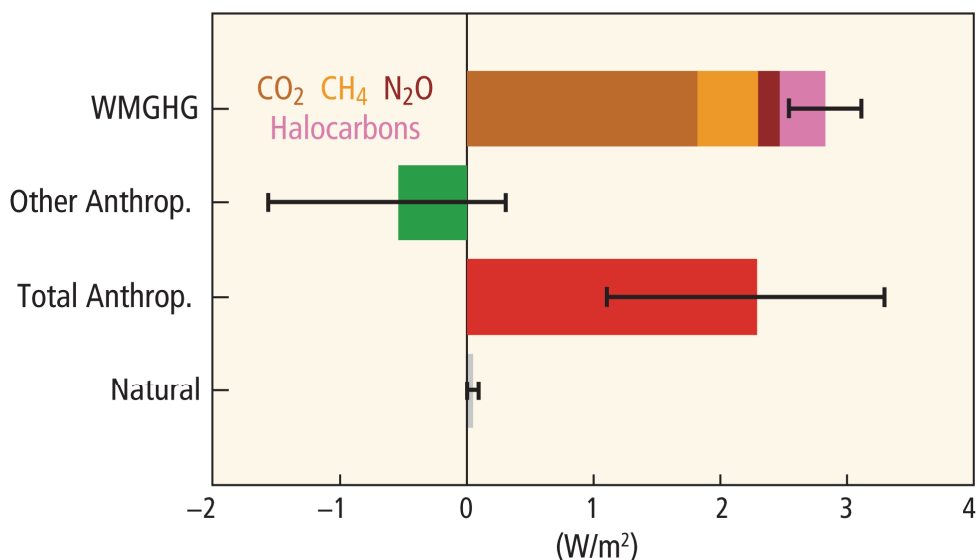


Рисунок 1.2 - Радиационное воздействие основных факторов в 2011 году по сравнению с началом индустриальной эры - условно, 1750 г.

По оси абсцисс – радиационное воздействие (Вт м^{-2}), по оси ординат показан вклад разных факторов (прямоугольниками различных цветов): хорошо перемешанных антропогенных парниковых газов (*WMGHG*); других антропогенных факторов (*Other antrop.*); суммарного антропогенного воздействия (*Total antrop.*) и естественных факторов (*Natural*). Горизонтальные отрезки означают степень неопределенности (интервалы 5-95%). «Другие антропогенные факторы» включают изменения аэрозольного состава, отражающих свойств земной поверхности (вследствие изменений в землепользовании) и содержания озона. «Естественные факторы» включают эффект изменения потока солнечной радиации и влияние вулканов (IPCC, 2014a).

В суммарном воздействии парниковых газов на современный климат вклад метана является не доминирующим, но заметным. Основным фактором, конечно, является рост концентрации углекислого газа - см. рис. 1.2. На рисунке видно, что эффект метана является вторым по вкладу после углекислого газа среди рассматриваемых парниковых газов.

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 для борьбы с изменением климата, по улучшению качества воздуха и защиты здоровья населения - «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»¹. 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 CO₂, небольшое время жизни таких веществ в климатической системе Земли способствует эффективности мер по ограничению их содержания в атмосфере – снижение глобального выброса уже в обозримом будущем (десятилетия и меньше) приводит к нужному эффекту.

В данной работе комплексно рассматривается проблема метана в аспекте его роли в современном изменении глобального климата и возможностей ограничения антропогенных выбросов в атмосферу.

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

¹ Или короткоживущих климатических загрязняющих веществ.

проблему самостоятельно путем ограничения выбросов парниковых газов на национальном уровне. Несмотря на все установленные 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, БРИКС², Арктического совета и др.), так и на уровне партнерства 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 (РКИК ООН или UN Framework Convention on Climate Change, UNFCCC). Она была принята и открыта к подписанию 9 мая 1992 года и вступила в силу 21 марта 1994 года. Это соглашение об общих прин-

² Организация Объединенных Наций (ООН), Организация экономического сотрудничества и развития (ОЭСР), группа из пяти стран: Бразилия, Россия, Индия, Китай, Южно-Африканская Республика (BRICS, принятая русская аббревиатура - БРИКС).

циях совместных действий для сдерживания процессов изменения климата на планете. Его цель сформулирована в статье 2 (ООН, 1992):

«Конечная цель настоящей Конвенции и всех связанных с ней правовых документов, которые может принять Конференция Сторон, заключается 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 (Федеральный закон, 1994). В настоящее время она ратифицирована 197³ государствами, которые, согласно Конвенции, разделены 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 и Китай.

³ Данные на февраль 2018 г. с официального сайта РКИК ООН unfccc.int.

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 (Конференция сторон, 1997), обязывающий развитые страны - стороны Протокола (в том числе Россию) сокращать выбросы парниковых газов и предусматривающий различные финансовые механизмы для этого. Поставленные в нем цели - сокращение суммарного выброса парниковых газов (метана в их числе) по крайней мере на 5% от уровней 1990 года в период с 2008 по 2012 гг. Документ вступил в силу 16 февраля 2005 года.

Участниками Киотского протокола являются 192⁴ 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 (Конференция сторон, 2012) включает новые обязательства для тех сторон Киотского протокола, которые договорились взять обязательства на второй период действия обязательств. Ратифицировали этот документ только 83 страны.

Наша страна ратифицировала Киотский протокол в конце 2004 года (Федеральный закон, 2004), 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 (Конференция сторон, 2015 г.). Этот документ уже ратифицирован 174⁵ странами и вступил в действие 4 ноября 2016 года.

⁴ Данные на февраль 2018 г. с официального сайта РКИК ООН unfccc.int.

⁵ Данные на февраль 2018 г. с официального сайта РКИК ООН unfccc.int.

Главная цель Парижского соглашения заключается в усилении глобальных мер по борьбе с изменением климата для удержания повышения глобальной температуры в этом веке в пределах +2 °С по отношению к доиндустриальному уровню и приложении усилий по снижению этого показателя даже до +1,5 °С.

Для этого страны-участницы определяют свои вклады в достижение декларированной 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 (Правительство РФ, 2016а, МИД РФ, 2016), 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 (Правительство РФ, 2016b).

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 CO₂, даже при высокой их успешности, скажутся лишь через несколько десятилетий или позднее. В этой ситуации в настоящее время активно предлагается идея сокращения выбросов 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 абсолютно всеми участниками саммита, в том числе Россией – «Действия G8 в сфере энергетики и изменения клима-

та». Речь в ней шла об учете и контроле короткоживущих факторов антропогенного воздействия на окружающую среду, в том числе метана.

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 со-основателями являлись Бангладеш, Канада, Гана, Мексика, США и 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) (CCAC, 2014). 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 нацеленный на практическую деятельность. В настоящее время членами коалиции являются: 58 стран; 63 негосударственных объединений, в том числе 17 международных (в частности, Всемирный банк, ЮНЕП, Программа развития ООН, Организация экономического сотрудничества и развития), а так же более 90⁶ различных отдельных организаций, как государственных, так и частных. Россия является членом Коалиции с 2014 года (CCAC, 2014).

На Саммите ООН по климату 2014 года в Нью-Йорке, США, по инициативе Коалиции транснациональные нефтяные и газовые компании объявили о решении объединить свои усилия с правительствами и международными

⁶ Данные на февраль 2018 г. с официального сайта Коалиции <http://ccacoalition.org>.

экологическими организациями с тем, чтобы сократить выбросы метана. В этих целях было создано «Нефтегазовое партнерство по метану» (Oil and Gas Methane Partnership), вошедшее в Коалицию (ССАС, UNEP, 2014). В него вошли как нефтегазовые компании, так и различные экологические организации. К инициативе также присоединились крупные нефте- и газодобывающие страны, в том числе России.

Во время проведения 22-й Конференции сторон в Марокко 14 ноября 2016 года Коалицией было представлено Марракешское коммюнике (ССАС, 2016), 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. До настоящего момента Россия к Марракешскому коммюнике не присоединилась.

Сейчас во многих странах, особенно развитых, наблюдается тенденция к ужесточению отношения к выбросам парниковых газов 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.

3. Ретроспектива концентраций метана в атмосфере

Содержание метана в атмосфере определяется соотношением потоков его поступления в атмосферу (эмиссиями) и выведения (стока), а также 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 климат менялся в различные эпохи. Результаты этого исследования были опубликованы международной группой авторов (Petit et al., 1999; Barnola et al, 2003; Jouzel et al., 1987, 1993, 1996). В работе были реконструированы значения температуры за промежуток времени примерно 420 000 лет. Результаты приведены на рис. 3.1.

Как видно на рисунке, концентрация CH_4 меняется циклически. Примерно каждые сто тысяч лет она достигает минимума - около 350 ppb⁷. Эти минимумы приблизительно соответствуют по времени великим оледенениям, которые регулярно повторяются. После достижения точки минимума происходит быстрый подъем концентрации CH_4 до величин 700-800 ppb 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 CO_2 . Сходно с поведением концентраций ведет себя температура. Согласно теории М. Миланковича (Миланкович, 1939), колебания

⁷ Распространенными единицами измерения содержания газов в атмосфере являются разновидности «объемного отношения смеси» (volume mixing ratio): млрд⁻¹ – части на миллиард (ppb, parts per billion), млн⁻¹ – части на миллион (ppm – parts per million) и т.п. В англоязычной научной литературе иногда встречаются ppbv, ppmv и т.п., что подчеркивает использование именно объемных (volume) величин для характеристики содержания веществ.

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 такие палеорекострукции сделаны уже для промежуточного времени примерно в 800 000 лет. Анализ газового состава пузырьков воздуха из ледовых кернов, отобранных в Антарктиде и Гренландии, позволил проследить эволюцию концентраций метана в атмосфере, а также температуры. Результаты приведены на рис. 3.2 (Loulerlegue et al., 2008).

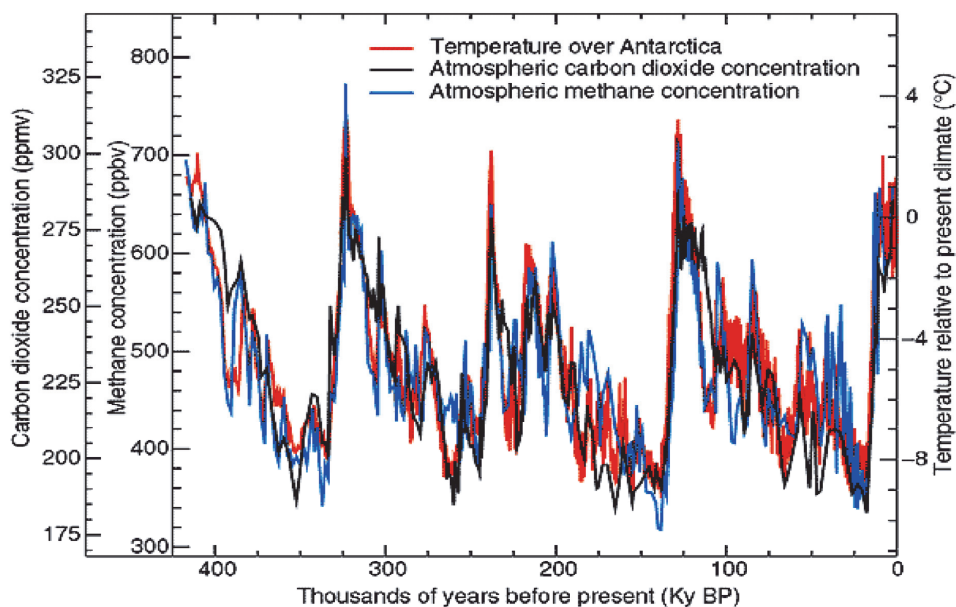


Рисунок 3.1 - Изменения температуры (красная кривая) и атмосферных концентраций CH_4 (голубая кривая) и CO_2 (черная кривая), полученные по результатам анализа антарктических ледовых кернов на станции «Восток» (Barnola et al, 2003).

По оси ординат: слева – концентрации углекислого газа (ppmv) и метана (ppbv), справа – изменение температуры относительно современного уровня (°C). По оси абсцисс - время в тыс. лет до настоящего времени.

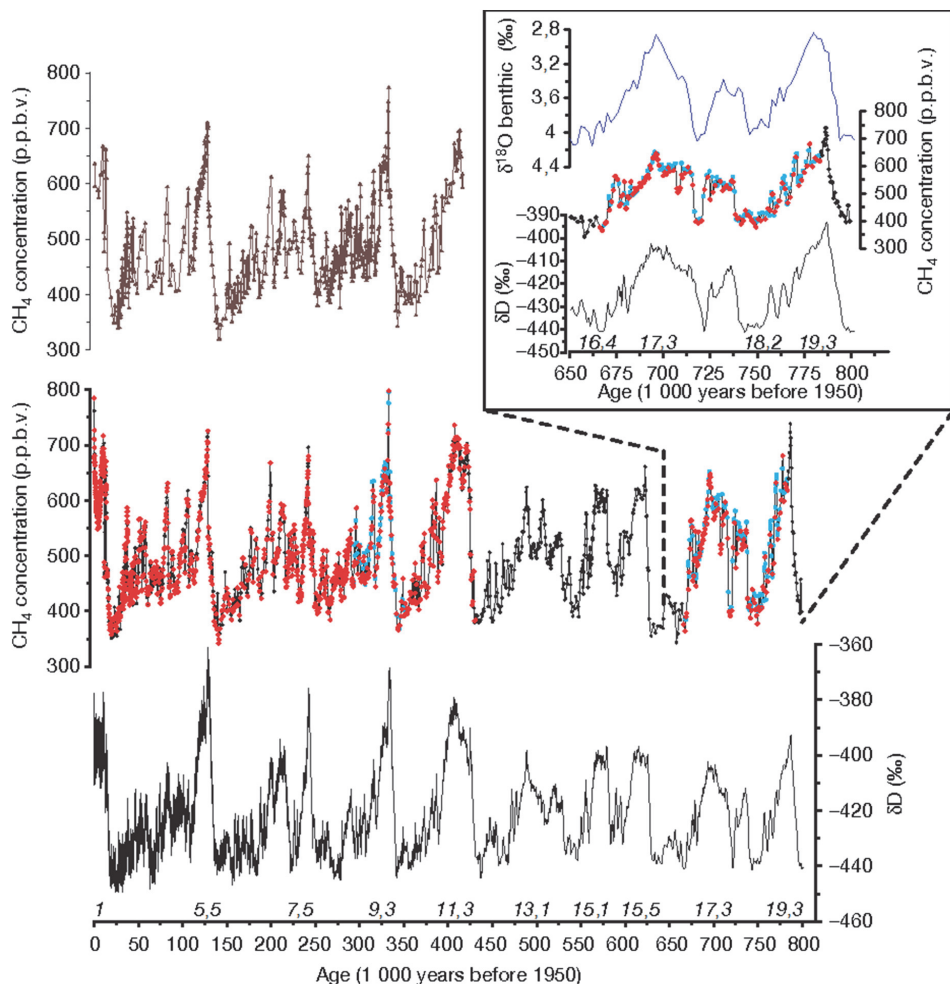


Рисунок 3.2 - Изменения содержания метана в атмосфере за 800 тыс. лет (Loulerlegue et al., 2008).

По оси ординат приведена концентрация CH_4 (ppb), по оси абсцисс – время в тыс. лет. За начало обратного отсчета времени (левый край шкалы) взят 1950 год. *Верхний график* - концентрации метана по данным ледового керна со станции «Восток», Антарктида. *Средний график* - по данным керна с купола «С», Антарктида (черные точки – данные другой группы исследователей (Spahni et al., 2005), красные - результаты анализа в Гренобле, синие - в Берне). *Нижний график* - 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 сопряженность значений.

Отметим, что концентрация метана за 800 000 лет никогда не превышала 800 ppb до индустриальной эры (условно – до 1750 г.). Поскольку до того интенсивность хозяйственной деятельности человечества была незначительной, концентрация CH_4 обеспечивалась только естественными процессами (Loulerlegue et al., 2008; Бажин, 2010).

Концентрация CH_4 , как и двух остальных главных «антропогенных» парниковых газа – CO_2 и N_2O – меняется сходно в различных точках географического пространства. На рис. 3.3 приведены концентрации метана на станциях Лоу-Доум в Антарктиде и в Гренландии с 1000 г. Эти данные – результат работы группы исследователей (Etheridge et al, 2002; Etheridge et al, 1998). На рис. 3.3 видно, что, во-первых, различия в концентрациях CH_4 в Антарктиде и Гренландии невелики, и, во-вторых, до начала индустриальной эры они колебались в пределах 625 - 675 ppb, а, начиная примерно в 1750 г., вышли из этого диапазона и начали систематически расти. Они достигли к концу XX века уровня примерно 1500 ppb.

В настоящее время глобальные концентрации метана в приповерхностном слое достигли 1800 ppb и более (Nisbet et al, 2016).

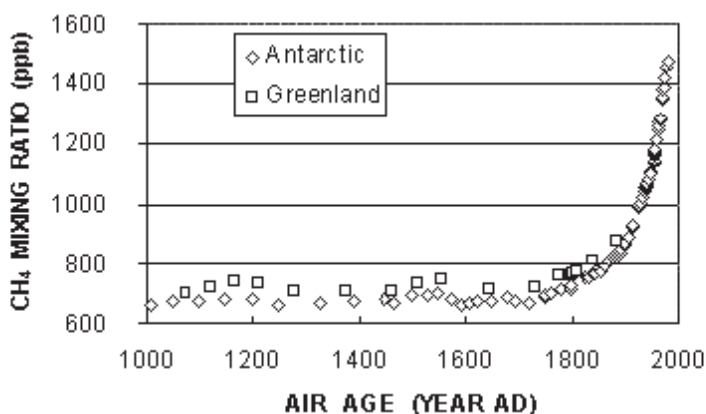


Рисунок 3.3 – Сравнительный ход концентрации метана с 1000 г. в Антарктиде (ромбы) и Гренландии (квадраты) (Etheridge et al, 2002).

По оси абсцисс – годы, по оси ординат – содержание метана в ppb.

4. Глобальный бюджет метана в атмосфере

Содержание метана в атмосфере определяется его поступлением в атмосферу и стоком из атмосферы. Напомним, что согласно п. 9 статьи 1 РКИК ООН (ООН, 1992) «источник» означает *«любой процесс или вид деятельности, в результате которого в атмосферу поступают парниковый газ, аэрозоль или прекурсор⁸ 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 практикуются два метода оценки источников/стоков парниковых газов: «снизу вверх» (bottom-up) и «сверху вниз» (top-down).

Метод *«снизу вверх»* - естественный и наиболее желательный. Он 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 атмосферу полностью определяется потоками с земной поверхности, то при применении метода оценки «сверху-вниз» устанавливается суммарное значение выбросов в исследуемом реги-

⁸ «Прекурсор» - предшественник, транслитерация англ. «precursor».

оне. 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 данных метеорологических наблюдений и моделей, а также с невозможностью достаточно подробно рассматривать отдельные виды источников, особенно антропогенных.

При оценке же эмиссий методом «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.

При этом значения, полученные методом «снизу вверх», для глобального общего выброса метана всегда несколько завышены (см. табл. 4.1), 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 CH_4 , ещё слабо изучены. При этом они часто отличаются высокой временной и территориальной изменчивостью и зависят от множества факторов, что в итоге может приводить к значительным расхождениям в оценках.

К настоящему времени проведено множество отдельных исследований:

- выполнены измерения (как наземные, так и спутниковые) распределений концентраций CH_4 в атмосфере (см. раздел 6.2), его потоков, связанных с различными источниками и стоками; получены и проанализированы палеоклиматические данные (см. раздел 3), а также данные о биогеохимическом цикле метана и его изотопном составе. Однако, только сведение этой информации 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 удаления из нее.

В связи с таким разнообразием информации, в качестве источников данных для настоящей книги были выбраны материалы, опубликованные несколькими признанными научными группами (в том числе МГЭИК, АООС США и GCP⁹), занимающимися разработкой и сведением глобального бюджета метана. Данные, использованные нами для составления глобального современного баланса метана (в период с 2000 г.) с применением различных подходов, приведены в табл. 4.1¹⁰. Исторические данные и реконструкции выбросов CH₄ приведены как 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.

⁹ Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) или Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC); Агентство по охране окружающей среды США (АООС США) или United States Environmental Protection Agency (US EPA); Глобальный углеродный проект (ГУП) или Global Carbon Project (GCP).

¹⁰ Далее в тексте в качестве итоговых цифр современных выбросов метана используются данные МГЭИК (за 2000-2009 годы) (Ciais et al., 2013) как наиболее широко цитируемые в литературе.

Таблица 4.1 - Вклады отдельных источников и стоков в глобальный бюджет CH_4 за 1990-1999 гг., 2000-2009 гг. и 2003-2012, оцененные методами «сверху вниз» и «снизу вверх» разными группами авторов, Мт(CH_4) в год; в квадратных скобках приведен интервал неопределенности (по Ciaia et al., 2013; Saunois et al., 2016).

Временной период	Ciaia et al., 2013				Saunois et al., 2016			
	1990-1999 гг.		2000-2009 гг.		2000-2009 гг.		2003-2012 гг.	
Источники и стоки метана/ модели оценки	«сверху вниз»	«снизу вверх»	«сверху вниз»	«снизу вверх»	«сверху вниз»	«снизу вверх»	«сверху вниз»	«снизу вверх»
<i>Естественные источники, всего</i>	182 [167-197]	336 [230-465]	218 [179-273]	347 [238-484]	234 [194-292]	382 [255-519]	231 [194-296]	384 [257-524]
Природные заболоченные территории	150 [144-160]	206 [169-265]	175 [142-208]	217 [177-284]	166 [125-204]	183 [151-222]	167 [127-202]	185 [153-227]
Другие источники, в том числе:	32 [23-37]	130 [61-200]	43 [37-65]	130 [61-200]	68 [21-130]		64 [21-132]	199 [104-297]
- Водные объекты (озера и реки)		40 [8-73]		40 [8-73]				122 [60-180]
- Геологические источники (включая океаны *)		54 [33-75]		54 [33-75] ^a				52 [35-76] ^b
- Дикие животные		15 [15-15]		15 [15-15]				10 [5-15]
- Термиты		11 [2-22]		11 [2-22]				9 [3-15]
- Природные пожары		3 [1-5]		3 [1-5]				3 [1-5]
- Многолетняя мерзлота (не включая озера и заболоченные территории)		1 [0-1]		1 [0-1]				1 [0-1]
- Метангидраты*		6 [2-9]		6 [2-9]				2 [0-5] ^a

Временной период	Ciais at al., 2013				Saunois at al., 2016			
	1990-1999 гг.		2000-2009 гг.		2000-2009 гг.		2003-2012 гг.	
Источники и стоки метана/ модели оценки	«сверху вниз»	«снизу вверх»	«сверху вниз»	«снизу вверх»	«сверху вниз»	«снизу вверх»	«сверху вниз»	«снизу вверх»
Антропогенные источники, всего	372 [290-453]	313 [281-347]	335 [273-409]	331 [304-368]	319 [255-357]	338 [329-342]	328 [259-370]	352 [340-360]
Сельское хозяйство и отходы, в том числе:	239 [180-301]	187 [177-196]	209 [180-241]	200 [187-224]	183 [112-241]	190 [174-201]	188 [115-243]	195 [178-206]
- Рисоводство		35 [32-37]		36 [33-40]		29 [23-35] ^b		30 [24-36] ^b
- Жвачные домашние животные**		87 [82-91] ^c		89 [87-94] ^{c,d}		103 [95-109] ^e		106 [97-111] ^e
- Отходы и сточные воды**		65 [63-68] ^e		75 [67-90] ^{e,f}		57 [51-61] ^e		59 [52-63] ^e
Сжигание биомассы (включая биотопливо)	38 [26-45]	42 [38-45]	30 [24-45]	35 [32-39]	35 [16-53]	30 [26-34]	34 [15-53]	30 [27-35]
Использование ископаемого топлива, в том числе**	95 [84-107]	84 [66-96]	96 [77-123]	96 [85-105]	101 [77-126]	112 [107-126]	105 [77-133]	121 [114-133]
- Добыча угля						36 [24-43]		41 [26-50]
- Нефтегазовая промышленность						76 [64-85]		79 [69-88]
Сток метана								
Химический сток, всего, в том числе:	515 [491-554]	571 [521-621]	518 [510-538]	604 [483-738]	514g	-	515g	-
- Тропосферный OH		479 [457-501]		528 [454-617]				
- Стратосферный OH		67 [51-83]		51 [16-84]				
- Стратосферный Cl***		25 [13-37]		25 [13-37]				
Почвы	27 [27-27]	28 [9-47]	32 [26-42]	28 [9-47]	32 [27-38]	-	33 [28-38]	-

Временной период	Ciais at al., 2013			Saunois at al., 2016		
	1990–1999 гг.		2000–2009 гг.	2000–2009 гг.		2003–2012 гг.
Источники и стоки метана/ модели оценки	«сверху вниз»	«снизу вверх»	«сверху вниз»	«сверху вниз»	«снизу вверх»	«снизу вверх»
Источники, всего	554 [529–596]	649 [511–812]	553 [526–569]	552 [535–566]	719 [583–861]	736 [596–884]
Сток, всего	542 [518–579]	599 [530–668]	550 [514–560]	546 ^b	-	-
Дисбаланс	12 [7–17]	-	3 [-4–19]	6 ^b	-	-
Темп роста в атмосфере	17	-	6	6 [4,9–6,6]	-	10 [9,4–10,6]

Примечания:

* в (Ciais at al., 2013) включены все геологические источники суммарно, а в (Saunois at al., 2016) были рассмотрены отдельно значения океанических (включая метангидраты) и наземных геологических источников;

** для (Saunois at al., 2016) группировка источников внутри категорий «сельское хозяйство и отходы» и «ископаемое топливо» соответствует группировке, используемой US EPA (см. табл. 4.2) и несколько отличается от использованной в (Ciais at al., 2013);

*** исправление авторов этой книги: в (Ciais at al., 2013; Saunois at al., 2016) «Тропосферный Cl»;

^a в (Saunois at al., 2016) значение для геологических источников на суше составляет 36 [15–57] Мт, суммарное значение для океанических источников (с учетом метангидратов) составляет 18 [2–40] Мт;

^b исходные данные в (Saunois at al., 2016): значение для геологических источников на суше составляет 40 [30–56] Мт, для океанических источников (с учетом метангидратов) значение 14 [5–25] Мт, в том числе чисто геологических - 12 [5–20] Мт;

^c значения приведены без учета навоза;

^d в (Saunois at al., 2016) значение с учетом навоза составляет 101 [98–105] Мт;

^e значения приведены с учетом навоза;

^f в (Saunois at al., 2016) значение без учета навоза составляет 63 [56–79] Мт;

^g рассчитан как разность между глобальным стоком и поглощением почвами;

^h общий сток оценен исходя из общего баланса масс и прямо не рассчитывался.

4.1. Основные источники метана

Химическим путем метана в атмосфере практически не образуется. Поэтому атмосферные источники CH_4 можно не рассматривать и считать, что поступление метана в атмосферу полностью определяется его потоками с земной поверхности (Кароль, Киселев, 2004).

Метан по происхождению может быть (Ciais et al., 2013; Kirschke et al, 2013; ЕРА, 2010; Бажин, 2010):

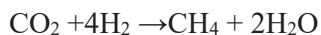
- бактериальный, образуется в результате деятельности анаэробных метаногенных бактерий, которые разлагают органическое вещество как в донных отложениях болот и других водоемов, так и в желудках животных, а также на свалках отходов;

- пирогенный, образуется при горении органики не ископаемого происхождения¹¹;

- термогенный, возникает при химической трансформации органического вещества осадочных пород в ископаемое топливо в условиях высоких температуры и давления на глубинах 3-10 км (это крайне медленный процесс)¹².

Согласно его современному происхождению метан в атмосфере классифицируют как биогенный - возникающий в результате бактериальных процессов разложения органики или ее сжигания, и абиогенный - обязанный своим происхождением использованию ископаемого топлива.

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



¹¹ Выделение метана в процессе сжигания ископаемого топлива обычно относят к термогенным процессам из-за происхождения топлива, но в некоторых литературных источниках оно отнесено к пирогенным (Kirschke et al, 2013).

¹² Возможно также образование метана в результате реакций неорганических соединений, как в промышленности, так и на больших глубинах в мантии Земли. В последнем случае возможным его источником может быть реакция оливина с водой в присутствии углерода.

Молекулярный водород для протекания этой реакции выделяется бактериями, не генерирующими метан, но развивающимися в той же самой среде (Кароль, Киселев, 2004).

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

При определении суммарного количества CH_4 , поступающего в атмосферу от каждого из источников, оценки разных авторов заметно различаются. Принцип классификации отдельных источников и их объединение в группы также имеет значение и может отличаться для разных исследований. Кроме того, интенсивность выбросов CH_4 изменяется со временем. Таким образом, рассматривать значения его эмиссий следует применительно к отдельным временным периодам и с учетом использованных методик и охвата источников.

Наибольший разброс глобальных оценок отмечен для природных источников 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 до 32% (данные МГЭИК 2000-2012 гг., см. табл. 4.1) от всех его выбросов и при этом отличаются высокой временной изменчивостью и зависимостью от климатических факторов.

На долю антропогенных выбросов приходится, по разным оценкам, от 50 до 60% глобального выброса CH_4 (данные МГЭИК 2000-2012 гг., см. табл. 4.1). В этом глобальном выбросе часть, связанная с сельским хозяйством и отходами, составляет примерно 60%, а с использованием ископаемого топлива - около 30%.

4.1.1. Естественные источники

Ежегодно из естественных источников в атмосферу попадает, по разным оценкам, от 220 до 350 Мт метана (данные МГЭИК 2000-2012 гг., см. табл. 4.1). Среди них наиболее интенсивен поток CH_4 с поверхности заболоченных территорий, составляющий до 80%.

Основными естественными источниками метана являются следующие (Бажин, 2010; ЕРА, 2010):

- *Заболоченные территории (в том числе 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 и посредством пузырьков.

- *Поверхностные водные объекты (в том числе 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.* Они являются достаточно интенсивным источником выделения метана благодаря процессу бактериальной ферментации, протекающему в 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 донные отложения (по большей части для океанского шельфа и мелководных заливов) и сама водная колонна. Существуют различные теории механизма таких выбросов. По большей части они считаются происходящими при анаэробном бактериальном разложении органики. Кроме того, в океан могут поступать выбросы метана от геологических источников, расположенных под его дном, и от метангидратов.

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

Помимо обычных источников метана – перманентных источников эмиссии - существуют так же его природные резервуары, содержащие большое 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, например, метангидраты (Бажин, 2010; Кароль, Киселев, 2004; ЕРА, 2010):

- *Многолетняя мерзлота.* Многолетнемерзлые породы содержат метан в составе воздуха во вмороженных в лед пузырьках воздуха, а также в виде гидратов метана (см. ниже). Его содержание в этих многолетнемерзлых породах составляет в среднем 2,3 мг/кг (Бажин, 2010). Такие породы содержат также большое количество органического вещества, могущего 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 соединения (клатраты) метана с водой, устойчивые только в определенном диапазоне низких температур и высокого давления. В одном кубометре гидрата метана содержится эквивалент около 164 м³ обычного газообразного метана. Такие соединения метана были обнаружены и на континентах, но большинство месторождений находятся на шельфе океанов.

- *Месторождения газа и нефти.* Природные газы, содержащие CH_4 , обычно подразделяются на три группы: природный газ чисто газовых месторождений, газ газоконденсатных залежей и попутный нефтяной газ. Метан при этом может входить в состав газа и газового конденсата, быть растворен в пластовых водах или нефти, находящихся под давлением на больших глубинах. Наибольшее количество такого метана (до 90-97%) содержится в газе газовых месторождений. Выделение CH_4 естественным путем из таких источников может происходить благодаря диффузионным и струйным процессам.

- *Угольные месторождения.* Метан содержится в углях в различных формах, в том числе в виде растворов, в свободном состоянии, а также в сорбированном 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. Такие процессы активизируются 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_4 , так как изменение температуры на один градус меняет интенсивность его выделения в микробиологических процессах примерно на 10% (Бажин, 2010).

4.1.2. Антропогенные источники

Ежегодно от антропогенных источников в атмосферу попадает около 330-335 Мт CH_4 (данные МГЭИК 2000-2012 гг., см. табл. 4.1). Распределение этих источников по объему выбросов метана и по годам приведено в табл. 4.1.

Таблица 4.2 - Выбросы метана от антропогенных источников за 1990 и 2005 годы (использован подход «снизу вверх»), а так же прогнозируемые выбросы на 2030 год (сценарий «Business-as-Usual»), Мт (CH_4) (ЕРА, 2012).

Категории источников/год	1990	2005	2030
Энергетика, всего			
<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
Промышленные процессы	0,4	0,4	0,3
Сельское хозяйство, всего			
<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
Отходы, всего			
<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
Итого:	298,5	324,6	408,8

В качестве дополнительного источника данных об антропогенной эмиссии метана в научной литературе и в данной книге используются результаты, полученные АОС США (таблица 4.1, ЕРА, 2012). На этой работе

основаны и различные прогнозные модели выбросов CH_4 до 2030 года, как для оценки изменения климата, так и для обоснования применения различных технологий сокращения выбросов и их оценки в денежных единицах (см. разделы 6.4 и 9, (ЕРА, 2013)).

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 часто несколько отличается, что может приводить к дополнительным различиям в итоговых данных.

В настоящее время наиболее значительными составляющими антропогенной эмиссии CH_4 являются выбросы от сельского хозяйства - около 60%. На втором месте по интенсивности выбросы от операций с ископаемым топливом, дающие до 30% антропогенных выбросов (что примерно сравнимо с выбросами от жвачных животных в сельском хозяйстве).

Основными антропогенными источниками метана являются следующие (Бажин, 2010; ЕРА, 2012; Ciais et al., 2013):

- *Домашние животные.* Так же, как и дикие животные, домашние животные, особенно жвачные, являются источниками CH_4 , образуемого в процессе пищеварения.

- *Рисовые поля.* Рисовые поля являются существенным 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 "благодаря" растениям, так как без них аналогично обработанные поля дают поток метана примерно в 50 раз меньше.

- *Отходы.* Размещенные на свалках отходы являются заметным источником метана, так как они содержат достаточно много влажного органи-

ческого материала, а внутри них создаются анаэробные условия, способствующие его образованию с участием бактерий. При использовании методик компостирования, в том числе навоза, так же выделяется значительное количество CH_4 . Количество выделяемого метана уменьшается при применении специальных технологий его улавливания и утилизации.

- *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 его улавливания и утилизации.

- *Угольная промышленность.* При добыче угля из месторождений в атмосферу поступает метан, выделяющийся как непосредственно при добыче угля и последующем обращении с ним, так и при дегазации угольных пластов, а также из шахт, где добыча уже прекращена. 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. Основным глобальный источник таких выбросов находится в Африке, где широко практикуется сжигание соломы при подготовке почвы для нового урожая.

- *Нефтегазовая промышленность.* Заметные объемы CH_4 выделяются при всех операциях с природным газом и нефтью (в том числе попутным нефтяным газом): от их разведки, добычи на месторождениях и до переработки на заводах и передачи потребителям. Источниками метана при этом являются утечки от оборудования и технологические продувки, а также возможные аварийные ситуации на различных этапах технологических процессов, сопровождающиеся стравливанием метана. Количество выделяемого CH_4 уменьшается при применении мер против утечек и технологий утилизации попутного нефтяного газа.

Историческая реконструкция глобальных антропогенных эмиссий CH_4 была выполнена в работе (Stern, Kaufmann, 1998) 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. Результаты этих оценок приведены на рис. 4.1. На нем четко виден тренд на повышение суммарных выбросов CH_4 с 1900 г., значительно усилившийся после 1950 года. Вклад рисоводства и животноводства в исторический период, так же, как и сейчас, - доминирующий.

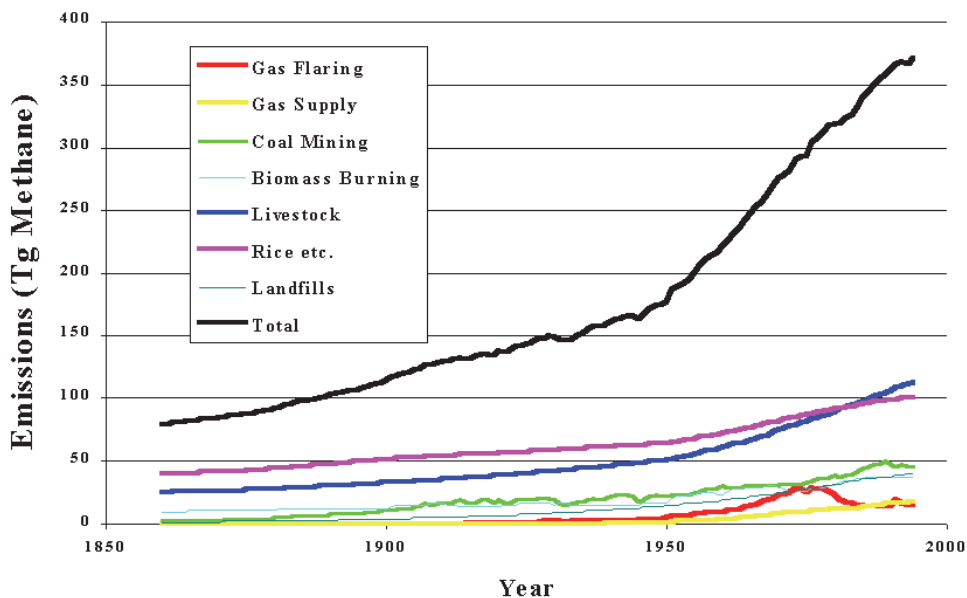


Рисунок 4.1 - Глобальные антропогенные выбросы CH_4 в 1860-1994 гг., $\text{Mt}(\text{CH}_4)^{13}$ (Stern, Kaufmann, 1998).

Источники выбросов: сжигание попутного и технологического газа (*красная линия*), газоснабжение (*желтая*), добыча угля (*зеленая*), сжигание биомассы (*голубая*), животноводство (*синяя*), рисоводство (*розовая*) и захоронение отходов (*сине-зеленая*). Суммарный выброс – *черная линия*. Ось ординат - годовая эмиссия метана $\text{Mt}(\text{CH}_4)$, ось абсцисс - годы.

¹³ $\text{Tg}(\text{CH}_4) = 1 \text{ Mt}(\text{CH}_4)$

4.2. Сток метана

Удаление (сток) метана из атмосферы происходит естественным путем вследствие химических (в атмосфере) и биохимических (в почве) процессов. С осадками удаление CH_4 из атмосферы практически не происходит, вследствие его малой растворимости в воде. Данные об объеме стока метана с учетом разных его механизмов приведены в табл. 4.1.

Молекулы CH_4 довольно устойчивы в атмосфере и взаимодействуют лишь с очень активными веществами. Это - гидроксил-радикал OH , атомы хлора Cl и возбужденные атомы кислорода $\text{O}(^1\text{D})$. Разрушение метана при реакции с радикалами OH происходит преимущественно в тропосфере, а с атомами хлора и кислорода - в стратосфере. При поглощении молекул метана из воздуха почвенными микроорганизмами он разрушается биохимическим путем в сравнительно небольших количествах. Этот процесс, в основном, происходит в сухих почвах лесов и степей (Бажин, 2010; ЕРА, 2012; Ciais et al., 2013).

Главным процессом стока метана является его химическая реакция с гидроксил-радикалом OH - 90% общего объема стока (Ciais et al., 2013). Более подробно эти процессы рассмотрены в разделе 5.

В качестве антропогенного «стока» (удаления метана из атмосферы) может рассматриваться применение технологий улавливания и утилизации CH_4 от антропогенных источников, однако интенсивность таких процессов сейчас невелика.

4.3. Сводные данные о современном бюджете метана

В табл. 4.1 представлены сводные данные глобального бюджета метана в атмосфере. Приведены потоки, характеризующие естественные и антропогенные источники, стоки, а также его накопление в атмосфере. Оценки приведены для периодов 1990-1999, 2000-2009 и 2003-2010 годов. Представлены отдельно оценки, полученные с помощью методов «сверху вниз» и «снизу вверх».

Соотношение интенсивности процессов эмиссии и стока метана определяет возможность его накопления в атмосфере, и, в итоге, изменение его концентрации в атмосфере (см. табл. 4.1 и 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 CH_4 из естественных заболоченных территорий являются основным фактором, обуславливающим наблюдаемую глобальную межгодовую изменчивость выбросов CH_4 . В этом отношении также играют определенную, но менее значительную роль, сжигание биомассы в годы, когда наблюдались обширные пожары (Ciais et al., 2013).

Несмотря на описанные выше сложности с получением данных о составляющих глобального бюджета метана, отмечается (Стокер и др., 2013) весьма высокая степень достоверности того, что увеличение содержания CH_4 в атмосфере с начала индустриальной эры до настоящего времени произошло в результате деятельности человека.

Таблица 4.3 – Глобальный бюджет метана за 2011 год, оцененный методом «снизу вверх» (Saunois et al., 2016).

Категория	Размерность	Значение
Общее содержание CH_4 в атмосфере	Мт (CH_4)	4954±10
Сток из атмосферы	Мт (CH_4) год ⁻¹	542±56
Изменение содержания в атмосфере	Мт (CH_4) год ⁻¹	14±3
Эмиссия из всех источников, в том числе:	Мт (CH_4) год ⁻¹	556±56
<i>из антропогенных</i>	Мт (CH_4) год ⁻¹	354±45
<i>из природных</i>	Мт (CH_4) год ⁻¹	202±35

5. Оценка «времени жизни» метана в атмосфере и факторы, его определяющие

Как мы видим, метан поступает в атмосферу в основном с земной поверхности, где расположены его естественные и антропогенные источники. Он перемещается вертикально за счет, в основном, конвекции. В стратосфере CH_4 «погибает» в ходе химических и фотохимических реакций, т.е. происходит безвозвратное его удаление из атмосферы.

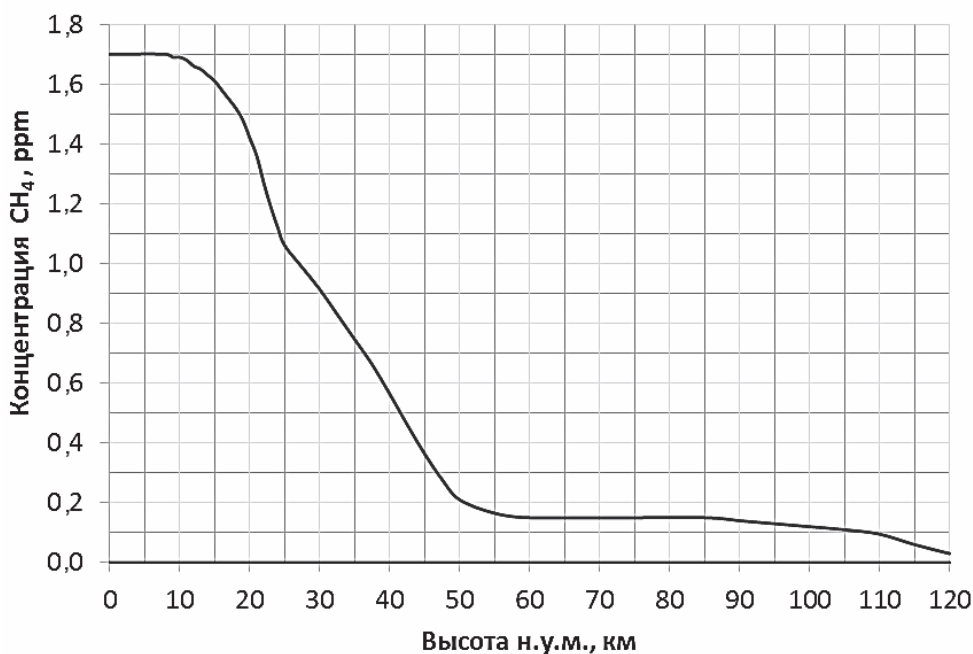
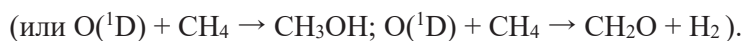
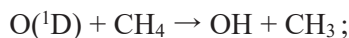
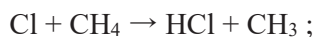
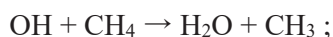


Рисунок 5.1 - Типичное вертикальное распределение содержания метана. По оси ординат – концентрация CH_4 (ppm); по оси абсцисс – высота над уровнем моря, км (U. S. Standard Atmosphere, 1976).

Такая «судьба» метана согласуется с характером его вертикального распределения в атмосфере. Типичное такое распределение – по американской «стандартной атмосфере» (U. S. Standard Atmosphere, 1976) – приведено на рис. 5.1. В тропосфере, до высоты примерно 10 км, концентрация CH_4 , выраженная объемным отношением смеси (volume mixing ratio, далее - VMR^{14}), 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 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 (Бажин, 2000; Дзюба, Елисеев, Мохов, 2012):



В ходе химических реакций с *гидроксил-радикалом* OH из атмосферы удаляется примерно 90% общего стока (Киселев, Решетников, 2013; Kiselev, Karol, 2000; 2002).

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



¹⁴ 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).

Возбужденные атомы кислорода $O(^1D)$ образуются при фотодиссоциации озона:



Если эта реакция требует достаточной интенсивности потока ультрафиолетового 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 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 (U. S. Standard Atmosphere, 1976)¹⁵. Эти данные примерно соответствуют 45° с.ш.

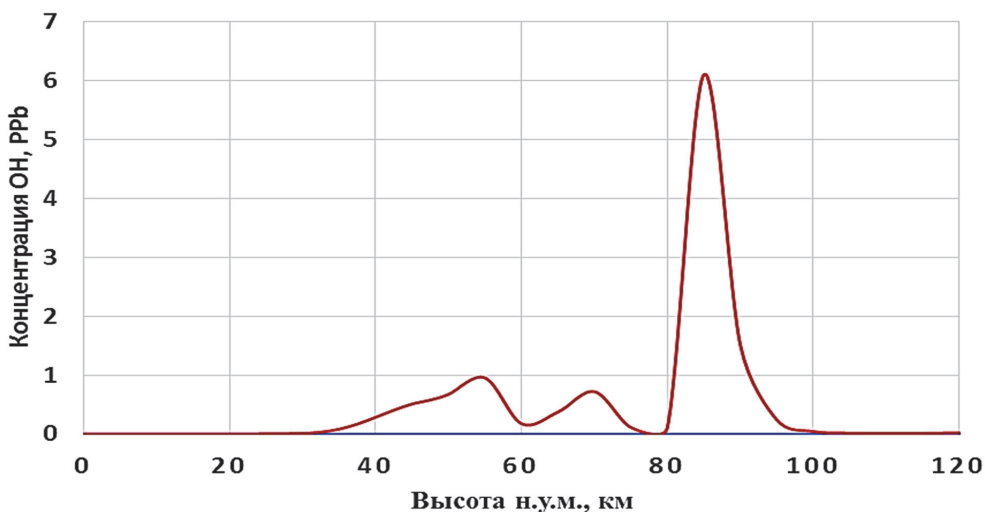


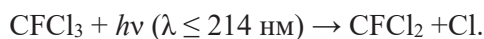
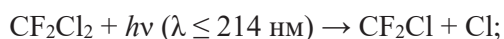
Рисунок 5.2 - Типичное вертикальное распределение содержания гидроксил-радикала.

По оси ординат – концентрация ОН (ppb); по оси абсцисс – высота над уровнем моря, км (U. S. Standard Atmosphere, 1976).

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

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 (Tijani, 2004). Это хлорфторуглероды, 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,



Атомарный хлор может появляться в атмосфере и по естественным причинам. Например, морская вода, вулканическая активность и лесные пожары могут быть источниками эмиссии хлорметана CH_3Cl . Это вещество способно к рекомбинации на 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 (Кароль, Киселев, 2004), 8-15 лет (Дзюба, Елисеев, Мохов, 2012), $9,1 \pm 0,9$ лет (Prather et al., 2012; Ciais et al., 2013, p. 509), 8-10 лет (Kirschke et al, 2013), $9,3 \pm 0,9$ лет (Voulgarakis et al, 2013). Обобщающая оценка МГЭИК – 12,4 года (IPCC, 2013).

Метан является сильным парниковым газом (его «парниковая» эффективность в расчете на единицу увеличения содержания в атмосфере на порядок превосходит эффективность углекислого газа, см. раздел 7). Однако, процессы выведения CH_4 из атмосферы, в свою очередь, зависят от климата. В работе (Дзюба, Елисеев, Мохов, 2012) показано, что время жизни метана в атмосфере с 1900 по 2005 гг. сократилось вследствие потепления климата примерно на 3%. В работе (Voulgarakis et al, 2013) 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.) (см. раздел 6.2).

6. Механизм влияния метана на климат

6.1. Основы

Главным источником энергии в земной системе¹⁶ 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.

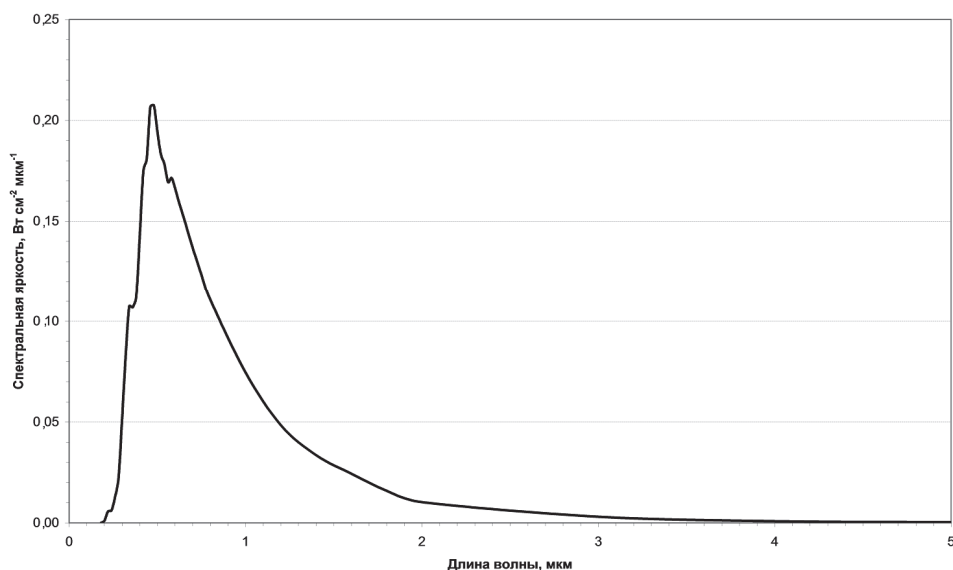


Рисунок 6.1 - Распределение солнечного излучения (спектральная плотность) на верхней границе атмосферы по длине волны (Матвеев, 2002, с. 133).

¹⁶ «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.

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 мкм.

На рис. 6.2 приведен современный глобальный бюджет энергии в земной системе по работе (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.

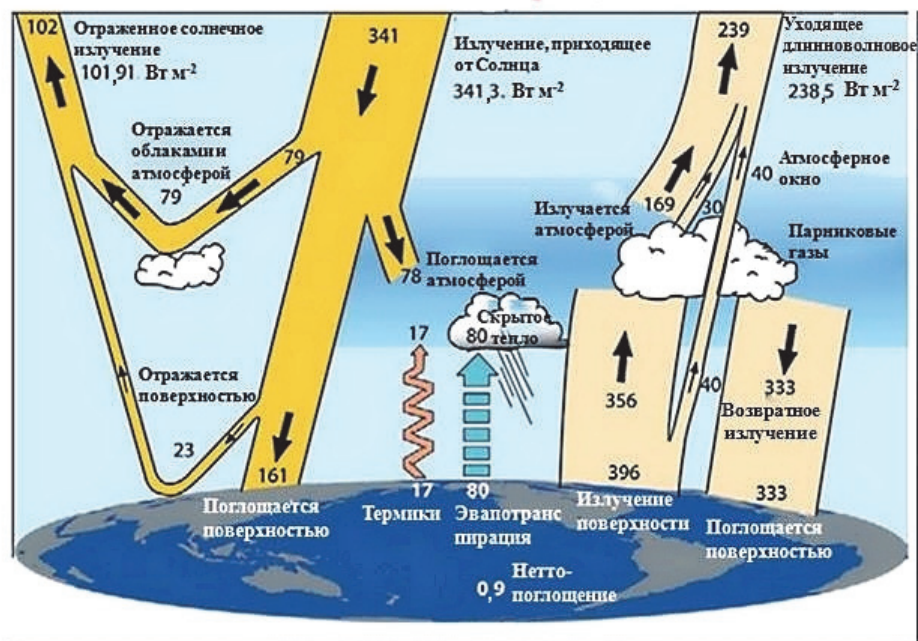


Рисунок 6.2 - Поток энергии (Вт м^{-2}) в системе «атмосфера + земная поверхность» (Trenberth, Fasullo, Kiehl, 2009).

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

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

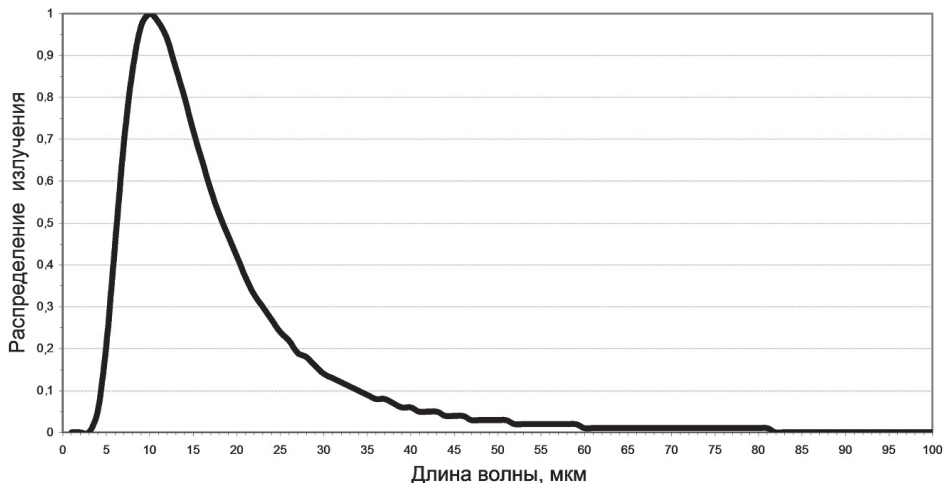


Рисунок 6.3 - Расчетное распределение излучения абсолютно черного тела по длинам волн при температуре поверхности $288,15 \text{ К}$ (Земля) в долях максимальной спектральной плотности.

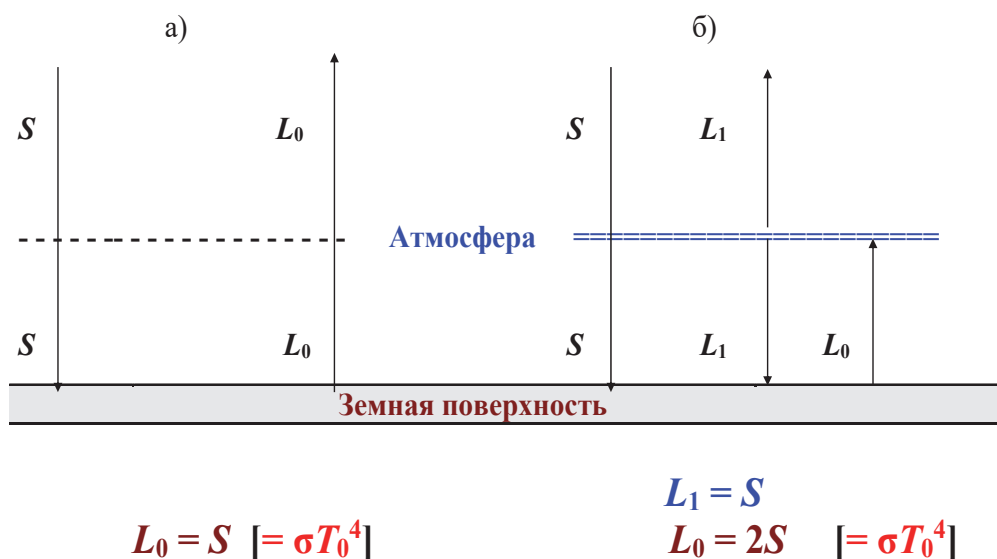


Рисунок 6.4 - Иллюстративная радиационная модель парникового эффекта. Пояснения: земная поверхность полностью поглощает все потоки излучения (коротковолновой S – солнечный, длинноволновой L_1 – излучение атмосферы), а атмосфера прозрачная для солнечного, коротковолнового излучения (поток S), но совершенно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

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 $S = \sigma T_0^4$.

На правой панели б) изображена такая же ситуация, но при наличии «тонкой атмосферы», которая нацело поглощает длинноволновое излучение. «Тонкая» означает, что излучаемые ею потоки длинноволновой радиации L_1 одинаковы в обе стороны – к земной поверхности и в космос. В состоянии радиационного равновесия $L_1 = S$, поскольку система ‘земная поверхность+атмосфера’ не нагревается и не охлаждается. А чтобы тем-

пература земной поверхности была постоянной, необходимо соблюдения условия: $L_1 + S = L_0$. Следовательно, на правой панели должно быть выполнено $L_0 = 2S$, т. е. при радиационном равновесии $2S = \sigma T_0^4$.

Таким образом, при наличии тонкой атмосферы, прозрачной для коротковолнового излучения и непрозрачной для длинноволнового излучения, в состоянии радиационного равновесия поток длинноволнового излучения от земной поверхности вдвое больше, чем в отсутствие атмосферы. В соответствие с законом Стефана-Больцмана абсолютная температура в первом случае больше, чем во втором, в $(2)^{1/4} \approx 1,2$ раза. Это и есть парниковый эффект в рассматриваемой иллюстративной модели системы «земная поверхность+атмосфера».

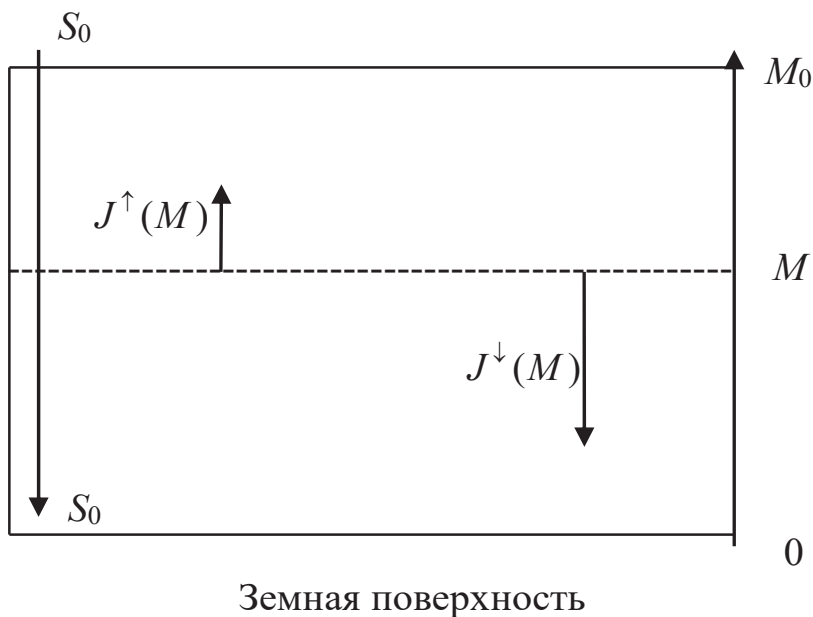


Рисунок 6.5 - Иллюстративная радиационная модель, в которой горизонтально-однородная атмосфера имеет непрерывное распределение по вертикали;
символы пояснены в тексте

На самом деле, атмосферу Земли нельзя считать «тонкой». Ее свойства существенно меняются с высотой. На рис. 6.5 приведена иллюстративная радиационная модель (Семенов, Попов, 2011; Семенов, 2012; Семенов, 2015), в которой горизонтально-однородная атмосфера непрерывно распределена по вертикали, т. е. является «толстой». Все приведенные на рисунке переменные – в среднем для единицы земной поверхности: S_0 – нисходящий поток солнечного, коротковолнового излучения; M_0 – полная масса столба атмосферы; M – переменная высоты, выраженной массой нижележащего воздуха; $J^\downarrow(M)$ и $J^\uparrow(M)$ – соответственно нисходящий и восходящий потоки длинноволнового, земного излучения на «высоте» M . Как и ранее, считаем, что солнечное излучение только коротковолновое, атмосфера для него совершенно прозрачна, и оно нацело поглощается земной поверхностью. Земная поверхность и атмосферные слои излучают только длинноволновое излучение, причем попадая на земную поверхность оно нацело поглощается.

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 ниже 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:

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

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 поглощения 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.

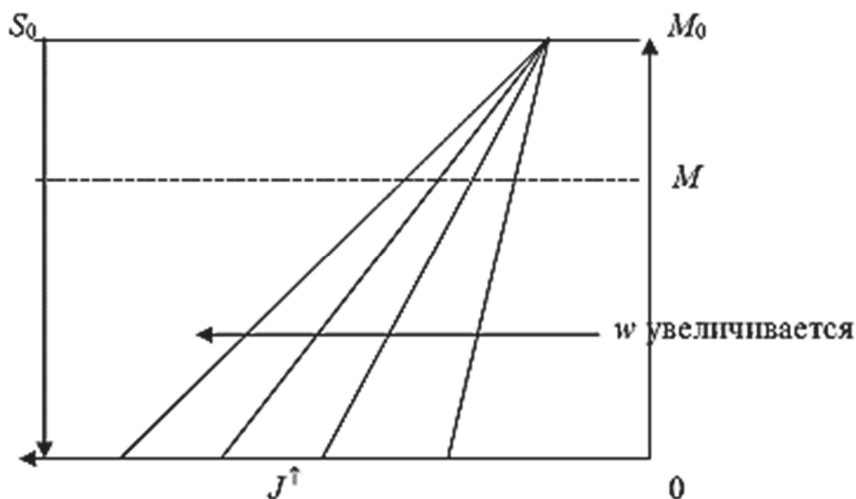


Рисунок 6.6 - Изменение восходящего потока длинноволнового излучения в зависимости от «высоты» M и коэффициента поглощения w .

Усиление поглощения инфракрасного излучения атмосферными слоями при обогащении атмосферы метаном следует из того, что он 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 (The HITRAN..., 1998) в ее версии 2008 г.¹⁷

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 при-

¹⁷Данные экспериментов приведены на портале <http://www.spectralcalc.com>.

ведены в $\text{ppb}^{-1}\text{см}^{-1}$. 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.

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.

На рис. 6.8 (Семенов, Попов, 2011) 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 .



Рисунок 6.7 - Коэффициент поглощения метана: по оси абсцисс – длина волны (мкм); по оси ординат – коэффициент поглощения ($\text{ppb}^{-1}\text{см}^{-1}$).

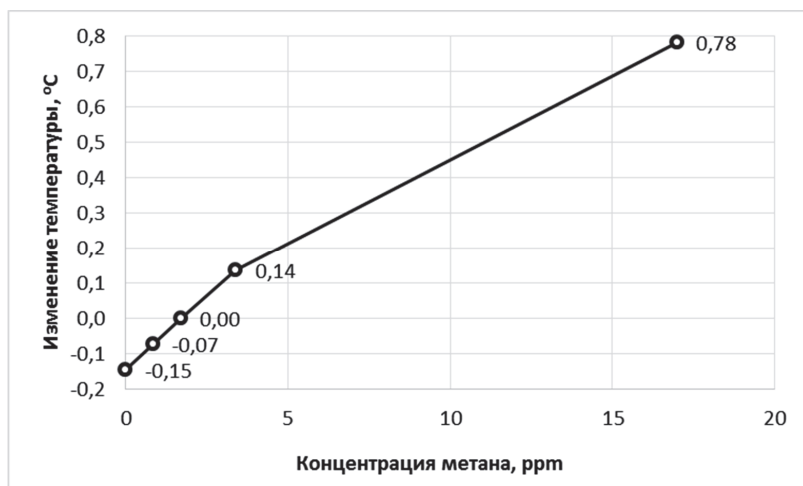


Рисунок 6.8 - Изменение радиационно-равновесной средней температуры земной поверхности (ось ординат, °C) в ответ на изменение концентрации метана (горизонтальная ось, ppm) при условии сохранения состава атмосферного воздуха по остальным компонентам неизменным и соответствующим состоянию 1970 г.

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

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 потеплением 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 (Кароль, 2004; Киселев, 2013). Однако, эффект совокупного действия всех этих факторов на температуру пока не ясен, действие их во многих случаях разнонаправленно.

6.2. Оценка современной концентрации метана в атмосфере и ее изменений 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 удаления из нее. При этом наблюдаемые значения этих концентраций отличается сезонной и широтной вариабельностью (рис. 6.9).

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.

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 условиях¹⁸. На рис. 6.9 представлено изменение концентрации метана (ppb) в весьма отдаленных друг от друга точках географического пространства, где расположены станции мониторинга, на которых производились систематические измерения (Prinn et al, 2000, 2016). Они расположены в Ирландии, в США (Орегон/Калифорния), на Барбадосе, на Самоа, в Тасмании (табл. 6.1). Измерения проводятся в рамках проекта Advanced Global Atmospheric Gases Experiment (далее – AGAGE)¹⁹, который выполняется при поддержке Нацио-

¹⁸ 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.

¹⁹ <http://agage.eas.gatech.edu/>

нального управления по авиации и исследованию космического пространства США (National Aeronautics and Space Administration - NASA).

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, и они были стабильны.

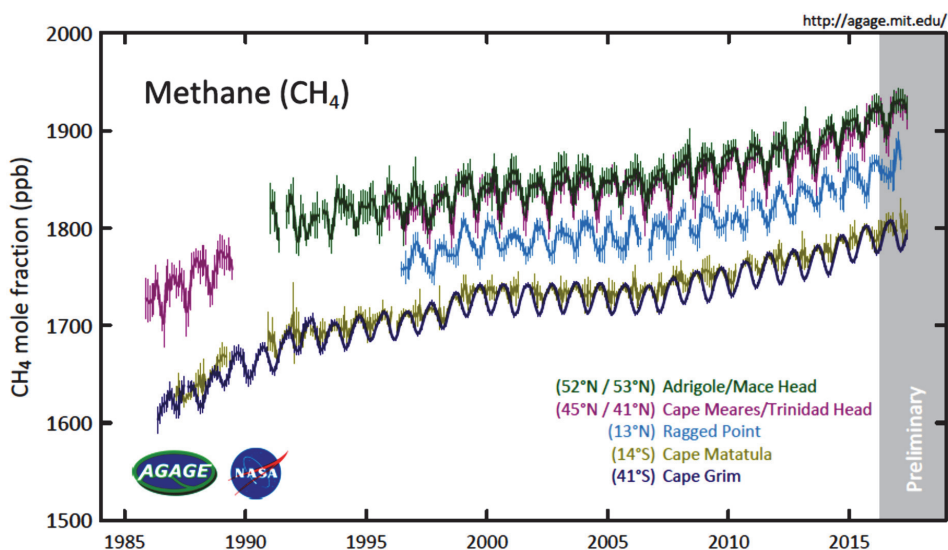


Рисунок 6.9 - Современное изменение среднемесячных концентраций метана (в ppb) в приповерхностном слое по годам по данным проекта AGAGE (Prinn et al., 2000, 2016): данные измерений в Ирландии, в США (Орегон/Калифорния), на Барбадосе, на Самоа, в Тасмании.

По оси ординат приведены концентрации метана (в ppb), по оси абсцисс – годы.

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 там несколько выше.

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 ненаправленной изменчивости - см. рис. 6.10. Однако, после 2007 г. рост глобальной концентрации метана возобновился – см. рис. 6.11.

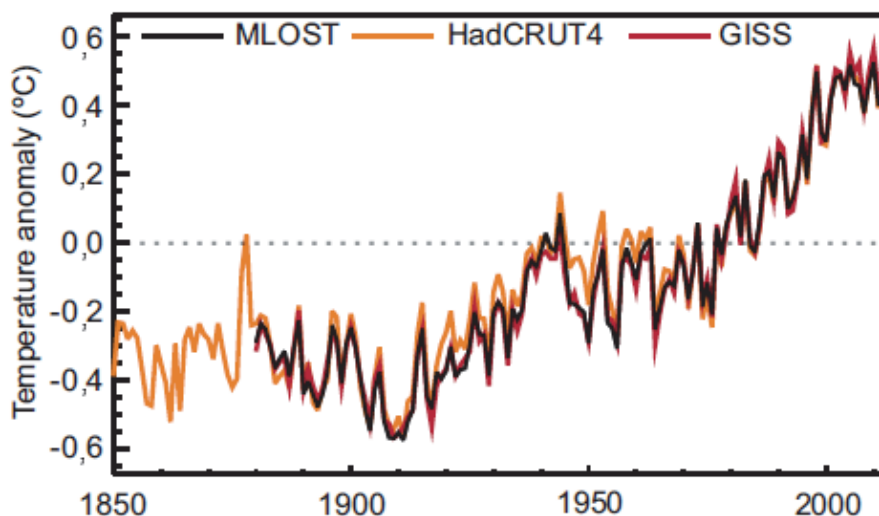


Рисунок 6.10 - Аномалии средней глобальной температуры (изображены три различных ряда данных наблюдений – MLOST, HadCRUT4 и GISS) в приповерхностном слое в 1850-2012 гг. по отношению к среднему значения за 1961-1990 гг. (IPCC, 2013, р. 193).

По оси ординат приведены величины аномалий (в $^{\circ}\text{C}$), по оси абсцисс – годы.

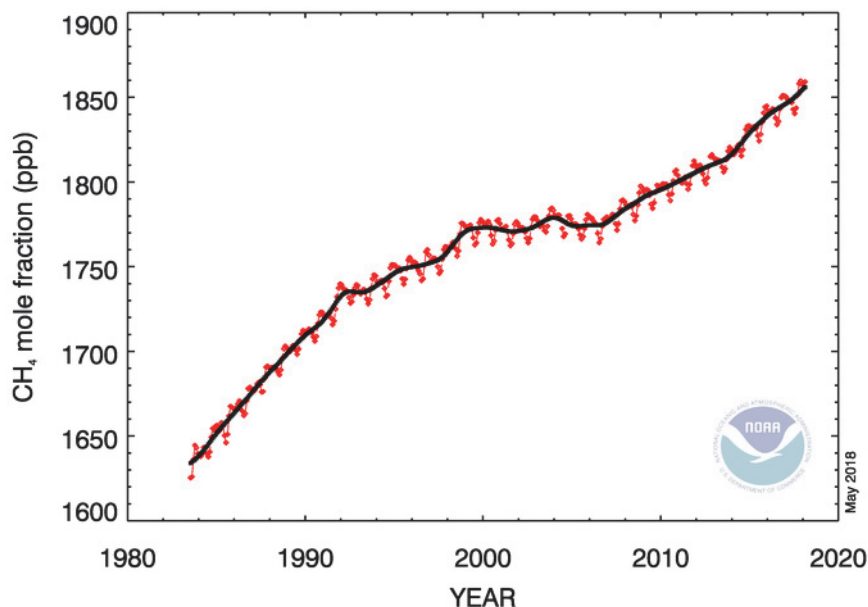


Рисунок 6.11 - Изменение среднемесячных глобальных значений концентрации CH_4 в приповерхностном слое (Dlugokencky et al., 2005, NOAA/ESRL²⁰; Nisbet et al., 2016).

По оси ординат приведено содержание метана (в ppb), по оси абсцисс – годы; черная линия – среднегодовые значения, красные точки – среднемесячные значения.

На рис. 6.12 показаны темпы роста содержания CH_4 в атмосфере в период между 1984 и 2014 гг. по данным фоновых измерений (Nisbet et al., 2016). С середины 1980-х по 1991 год концентрация метана возрастала 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 CH_4 в атмосфере стабилизировалась. Однако начиная с 2007 года, она вновь начала расти, и до 2013 года темп ее роста составлял около 5,7 ppb в год, а к 2014 г. – около 15 ppb в год.

²⁰ www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends_ch4.

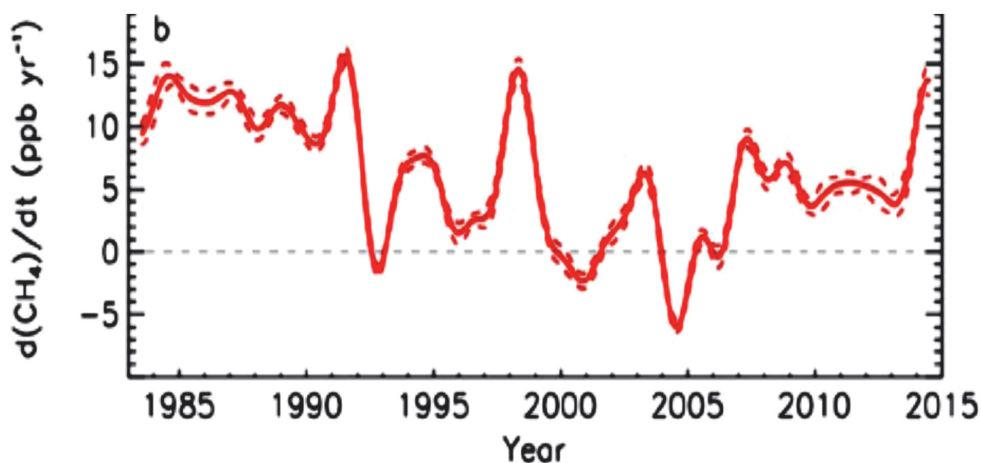


Рисунок 6.12 - Темпы роста содержания метана в атмосфере в 1984-2014 гг., (Nisbet et al., 2016).

По оси ординат – темп роста концентрации CH_4 (ppb год^{-1}), по оси абсцисс – годы. Прерывистая линия показывает стандартное отклонение.

На рис. 6.13 изображено изменение глобальной концентрации метана за последние 800 000 лет. Эти данные представлены Агентством по охране окружающей среды США²¹ и являются результатами палеореконовструкций 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%.

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

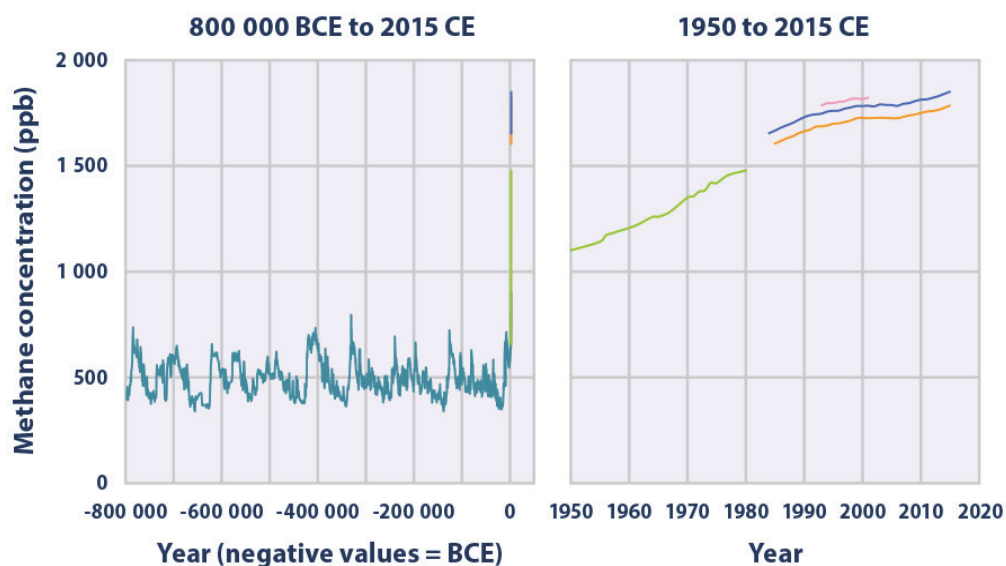


Рисунок 6.13 - Естественные колебания глобальной концентрации метана в последние 800 000 лет и ее рост в индустриальную эру²².

По оси ординат приведена концентрация CH_4 в ppb, по оси абсцисс – годы (на левой панели на оси абсцисс отрицательные значения – время до н.э).

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 – CO_2 , CH_4 и N_2O . На рисунке видно, что наиболее существенное относительное увеличение присуще именно метану.

²² <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-atmospheric-concentrations-greenhouse-gases>

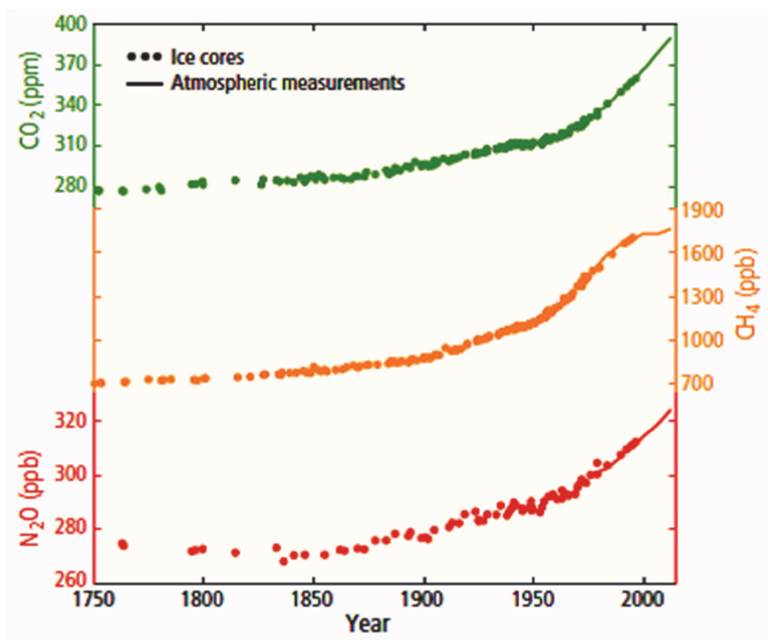


Рисунок 6.14 – Изменение глобальных концентраций CO_2 (ppm, *зеленый цвет*), CH_4 (ppb, *оранжевый цвет*) и N_2O (ppb, *красный цвет*) в индустриальный период.

Данные реконструкций по ледовым кернам и результаты инструментальных измерений; по оси ординат – концентрации газов, по оси абсцисс - годы (IPCC, 2014).

Существует весьма высокая степень достоверности того, что такое увеличение содержания метана в атмосфере в индустриальный период произошло в результате хозяйственной деятельности человека (см. разделы 3 и 4.1, 4.3). По оценкам МГЭИК (IPCC, 2013) примерно 48-65% глобальной современной эмиссии CH_4 в период 1990-2009 гг. приходились на антропогенный выброс (или около 50-60% для периода 2000-2009 гг., по данным, приведенным ранее в этой книге в разделе 4).

6.3. Существующие подходы к моделированию и прогнозу эмиссии и концентраций 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) CH_4 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 его концентрации в атмосфере. Это неоднократно происходило в последний миллион лет – см. рис. 3.1.

Глобальная антропогенная эмиссия CH_4 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 являются так называемые сценарии мирового развития. Приведем определение понятия «сценарий», которое дает МГЭИК в Пятом оценочном докладе во вкладе Рабочей группы I²³ (IPCC, 2013, Glossary): *«Правдоподобное описание будущего развития, основанное на согласованной и внутренне непротиворечивой совокупности предположе-*

²³ 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.

ний о ключевых движущих силах (например, темпе технологического развития, ценах) и зависимостях».

Сценарии могут иметь различный временной горизонт – быть кратко- и среднесрочными (на срок до 2030 года) или долгосрочные (на сроки после 2030 года). В них закладываются предположения по широкому набору параметров, определяющих динамику выбросов CH_4 . Сценарии могут различаться подходом к долгосрочному моделированию (оптимизационные и имитационные модели), степенью детализации процессов, сопровождающихся выбросами метана, гибкостью отражения набора мер по контролю за выбросами²⁴.

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 технологий (Башмаков, Мышак, 2013; Kirtman et al, 2013; IPCC, 2013). 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» (Houghton et al, 1990; Башмаков, Мышак, 2013; Kirtman et al, 2013; IPCC, 2013).

Зачастую моделирование и прогнозирование производятся отдельно по каждому сектору экономики, либо региону с последующим суммированием результатов (Mueller, Bartsch, 1999; EPA, 2012).

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 (Houghton et al, 1990; Луговой и др., 2014; EPA, 2012):

²⁴ <http://instituciones.com/strategies/2521-zatraty-vygody-realizacii-strategij-nizkouglerodnogo-razvitiya-rossii.html>

- **BASE (базовый).** На практике в экономических секторах всегда имеют место некоторые изменения: обновление основных средств и расширение производства, перенаправление инвестиций в наиболее современные доступные технологии, являющиеся более эффективными и прочее. Сценарий BASE не учитывает подобных изменений, вследствие чего он далек от реальной экономической ситуации. Поэтому сценарий является искусственным, а его цель - наглядно отразить потенциал энергосбережения за счет перехода на новые технологии.

- **Business-as-Usual (BAU)** - сценарий *«обычного хода дел»*, инерционный. Он не предполагает дополнительных мер 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 сценариев, будут характеризоваться более оптимистичными результатами.

Отдельно стоит выделить долгосрочные сценарии возможного социально-экономического развития, представленные Межправительственной группой экспертов по изменению климата – МГЭИК (IPCC SRES, 2000; Kirtman et al, 2013; IPCC, 2013). МГЭИК катализировала разработку мировым научным сообществом группы сценариев и оценку соответствующих траекторий антропогенных эмиссий климатически активных веществ, прежде всего, парниковых газов. Однако эти сценарии предназначены не столько для исследования изменений выбросов парниковых газов в будущем, сколько для комплексной оценки будущих возможных изменений климата. Эти сценарии более сложные и учитывают более широкий набор входных параметров по сравнению с упомянутыми выше.

Первое семейство долгосрочных сценариев социально-экономического 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 (Leggett et al, 1992; Pepper et al, 1992)²⁵. 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 ограничения выбросов, дополнительных к существующим. Предположения, которые были заложены в этих сценариях, по большей части были взяты из публикаций профильных международных организаций.

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 – (IPCC, 1995)).

В 2000 г. был выпущен Специальный доклад по сценариям выбросов (Special Report on Emission Scenarios, далее SRES) (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 (IPCC, 2000, pp. 4-5).

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

²⁵ <http://sedac.ipcc-data.org/ddc/is92/>

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.

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 глобальных решениях 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 локальных решениях 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 основ-

ных линий семейств В1 и А1. 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 были разработаны 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 А1В, А2, В1 и В2, а также два дополнительных для групп А1FI и А1Т. 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. В рамках этих сценариев были определены так называемые репрезентативные траектории концентраций – РТК (representative concentrations pathways – RCP) (Kirtman et al, 2013; IPCC, 2013). Семейство состоит из четырех сценариев: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 и RCP8.5. Они маркированы (см. 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⁻² соответственно) (Weyant et al, 2009; IPCC, 2013).

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 термин «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 глобального антропогенного выброса метана в атмосферу для XXI века и соответствующие последствия для уровней содержания метана рассмотрены в следующем разделе.

6.4. Сценарии изменения эмиссии и концентраций метана

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

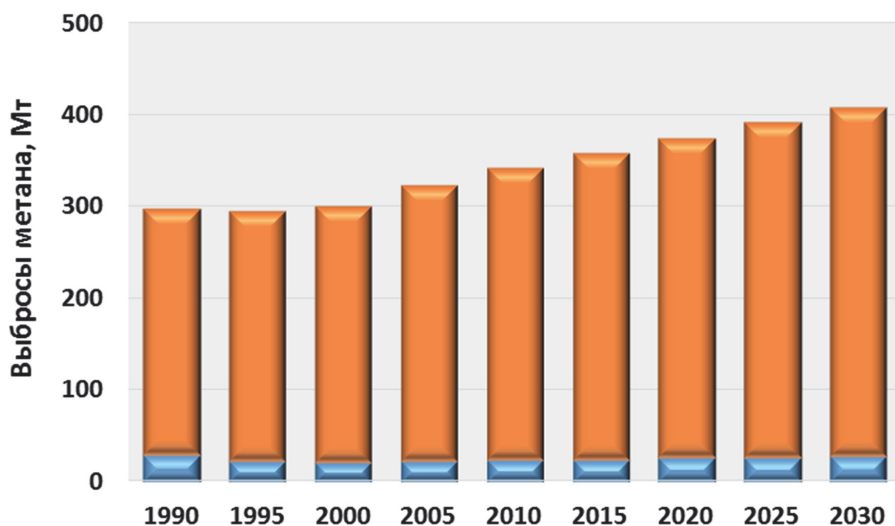


Рисунок 6.15 – Оценки глобальных годовых антропогенных выбросов метана в Мт (CH_4) (оранжевый цвет) до 2030 года с выделенной долей Российской Федерации (голубой цвет).

Диаграмма составлена по данным АОС США (ЕРА, 2012).

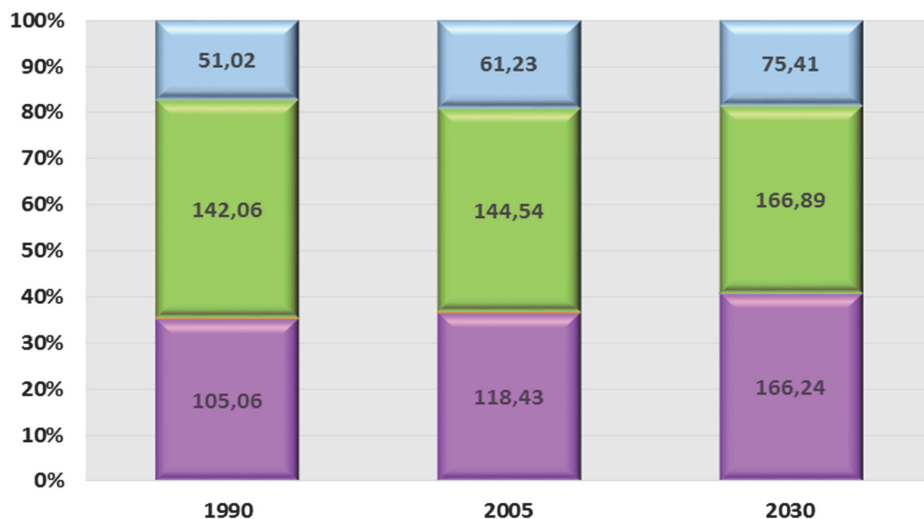


Рисунок 6.16 – Глобальные годовые антропогенные выбросы метана в Мт(CH_4) в 1990, 2005 и 2030 годах с детализацией по основным секторам экономики - источникам эмиссии метана.

Вклады секторов показаны различными цветами: энергетика (голубым), сельское хозяйство (зеленым), отходы (сиреневым). Диаграмма составлена по данным АОС США (ЕРА, 2012).

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

Согласно данным, приведенным на рис. 6.16, в 2030 году основные вклады в глобальный антропогенный выброс метана будут приходиться на энергетику (главным образом, на нефтегазовый и угольный сектора), сельское хозяйство (ферментация при пищеварении животных и рисоводство) и отходы (твердые отходы и сточные воды). На этом отрезке времени согласно данной перспективной оценке относительные вклады секторов экономики в суммарный антропогенный выброс CH_4 останутся практически без изменений в сравнении с текущими значениями и составят 39,0%, 39,6% и 21,4% соответственно для секторов энергетики, сельского хозяйства и отходов.

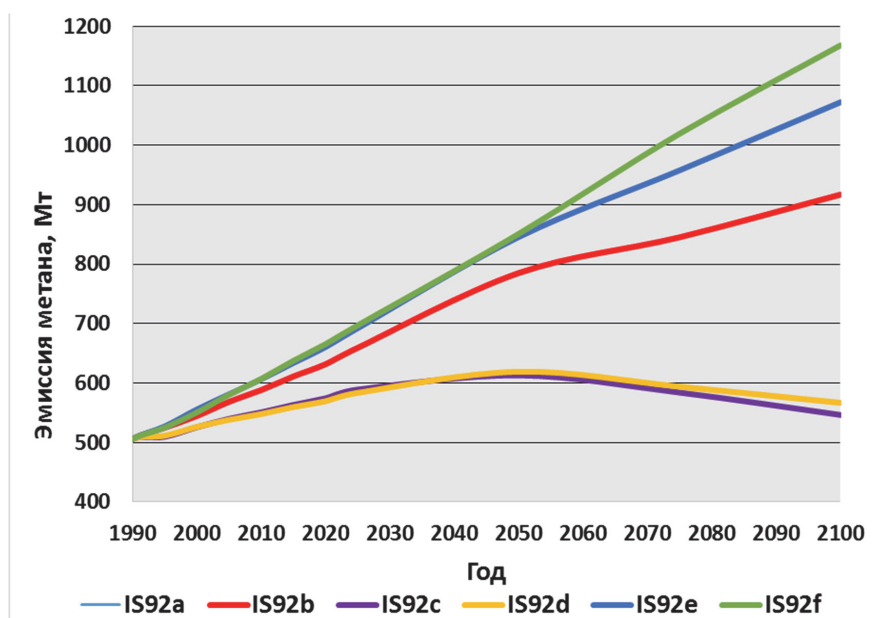


Рисунок 6.17 – Глобальные годовые антропогенные выбросы метана в Мт (CH_4) до 2100 года, построенные на базе сценариев IS92.

Составлено по данным работ (Leggett et al, 1992; Pepper et al, 1992).

Глобальные антропогенные выбросы метана, соответствующие шести сценариям семейства IS92, описаны в работах (Leggett et al, 1992; Pepper et al, 1992). Они представлены на рис. 6.17²⁶. Как видно на рисунке, в семействе IS92 в отношении выбросов метана можно выделить «наихудшие» сценарии (IS92e и IS92f) и «наилучшие» сценарии (IS92c и IS92d). Самые высокие выбросы CH₄ в конце нашего столетия соответствуют сценарию IS92f, который, среди прочих допущений, сочетает высокий рост населения на фоне сравнительно низкого экономического роста. Выбросы метана при данном сценарии превысят 1100 Мт (CH₄) к концу XXI века.

Для сценариев IS92c и IS92d предполагается, что население вначале растёт, а затем к середине XXI 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 (CH₄) 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 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 (Leggett et al, 1992; IPCC SRES, 2000; Kirtman et al, 2013; IPCC, 2013). Согласно IS92a уровень выбросов метана к 2100 году незначительно превысит 900 Мт (CH₄) в год.

Траектории выбросов метана, изображенные на рис. 6.18, соответствуют (кроме IS92a) сценариям, представленным в Специальном докладе МГЭИК о сценариях выбросов (IPCC SRES, 2000). «Наилучшие» сценарии демонстрируют рост объема выбросов до середины столетия с последующим спадом. При «наихудших» сценарии происходит рост объема выбросов CH₄ в течение всего периода 1990-2100 гг.

²⁶ Соответствующие данные размещены на сайте <http://sedac.ipcc-data.org/ddc/is92/>.

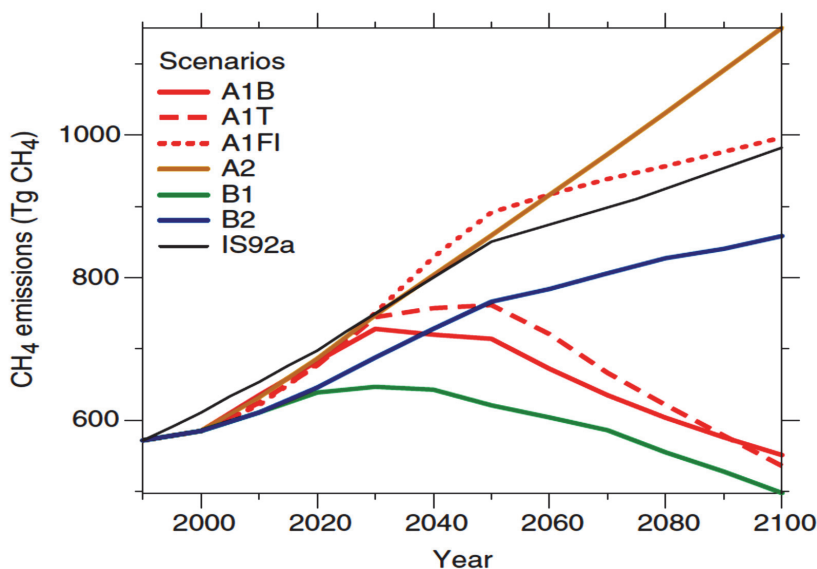


Рисунок 6.18 – Глобальные годовые антропогенные выбросы метана в 1990-2100, соответствующие разным сценариям SRES и IS92a (IPCC, 2000).

По оси ординат приведены выбросы метана (в Мт (CH₄))²⁷, по оси абсцисс – годы.

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 метана неизбежно порождают существенное расхождение траекторий концентраций, особенно, в конце рассматриваемого периода времени - в 2100 г., что, в свою очередь, приводит к различиям в оценках будущего климата.

На рис. 6.19 приведены соответствующие траектории концентраций CH₄. 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*.

²⁷ 1 Tt(CH₄) = 1 Mt(CH₄)

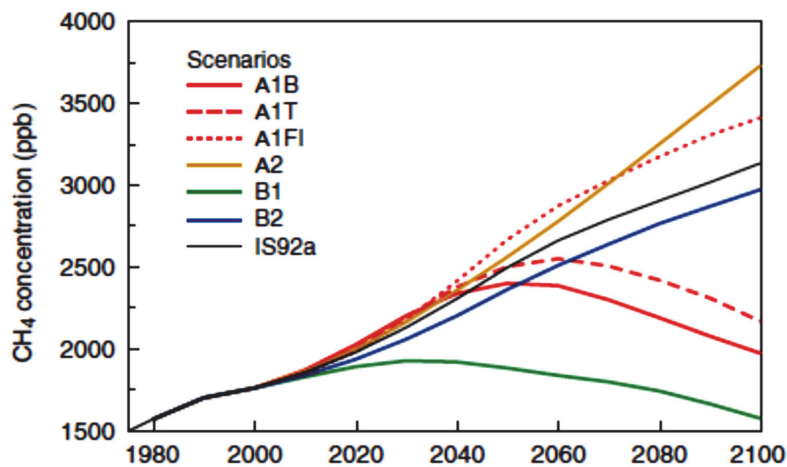


Рисунок 6.19 – Ход глобальной концентрации CH_4 в XXI веке в условиях сценариев SRES и IS92a (IPCC, 2001a, p. 65).

По оси ординат приведены глобальные концентрации метана (в ppb), а по оси абсцисс – годы.

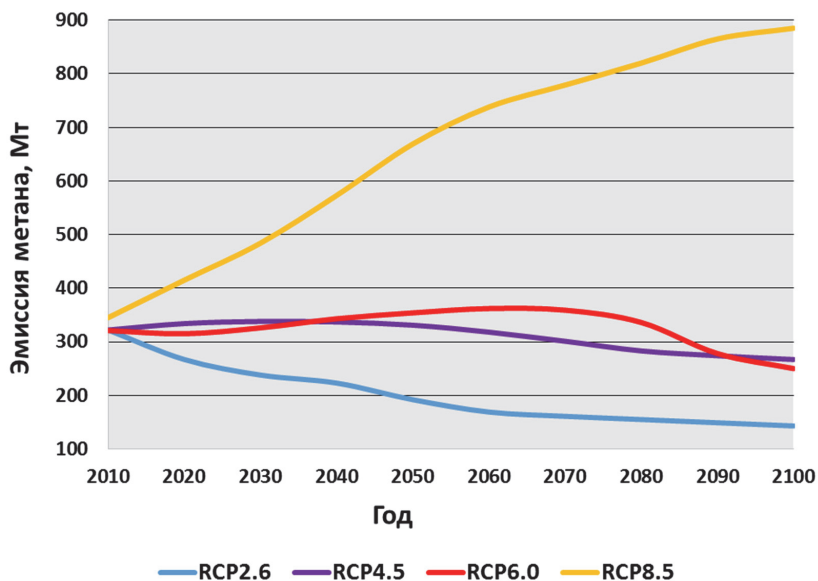


Рисунок 6.20 – Глобальные годовые антропогенные выбросы метана согласно различным сценариям семейства RCP.

Составлено по данным работ (Kirtman et al, 2013; IPCC, 2013).

В Пятом оценочном докладе МГЭИК, который вышел в 2013-2014 гг., были обобщены соответствующие оценки, сделанные в условиях сценариев семейства RCP (IPCC, 2013). 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 CH_4 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 (CH_4) к 2100 году. «Наихудший» сценарий RCP8.5, напротив, предполагает рост выброса метана до уровня 900 Мт (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 CH_4 к 2100 году, хотя и более медленное, чем при «наилучшем» сценарии.

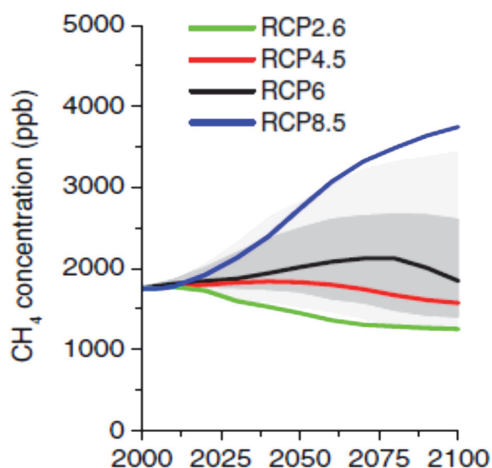


Рисунок 6.21 – Ход глобальной концентрации CH_4 в XXI веке в условиях различных сценариев RCP (Clarke et al, 2010; van Vuuren et al, 2011).

Светло-серый цвет показывает 98%-й доверительный интервал, а темно-серый - 90%-й. По оси ординат приведены значения концентрации метана (ppb), по оси абсцисс – годы.

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 CH_4 начинает убывать уже в XXI веке, не достигнув значений 2250 ppb.

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 (Kirtman et al, 2013; IPCC, 2013).

Отметим также, что глобальный антропогенный выброс метана в условиях среднесрочного сценария BAU, разработанного АОС 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.

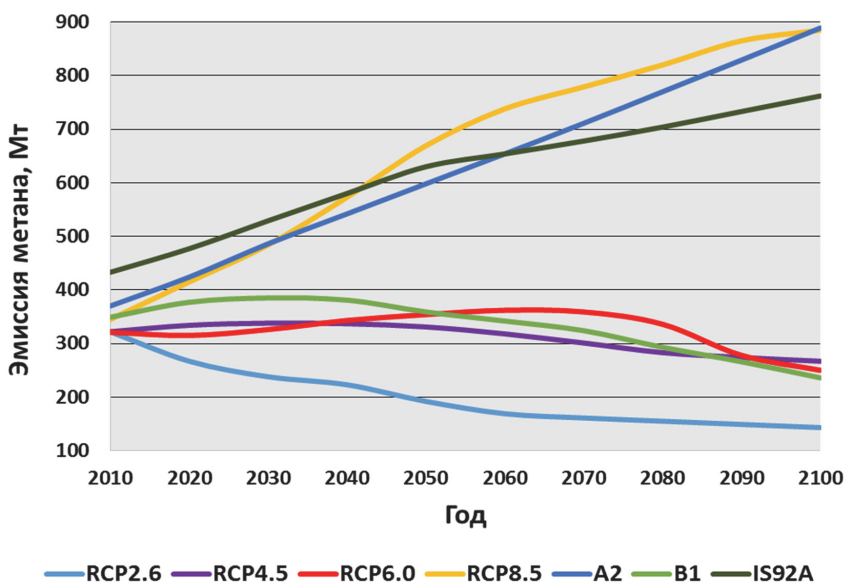


Рисунок 6.22 – Сопоставление глобальных годовых антропогенных выбросов метана в 2010-2100 гг. в условиях сценариев различных семейств.

График составлен по данным (IPCC, 2013).

7. Показатели, оценивающие влияние метана на интенсивность парникового эффекта

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). Оно определяется следующим образом (IPCC, 1995, р. 169): *«радиационное воздействие на систему «тропосфера - земная поверхность» (вследствие, скажем, изменения концентрации какого-либо парникового газа) есть изменение нетто-потока (Вт 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 нетто-поток есть разность нисходящего и восходящего потоков.

При проведении модельных расчетов изменения средней глобальной приповерхностной температуры ΔT в ответ на заданное радиационное воздействие ΔF 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 ΔF (IPCC, 2001, р. 354). Этот коэффициент пропорцио-

нальности 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 (global warming potential, далее - 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, Вт м² 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 $AGWP_r$:

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

GWP - безразмерная величина. Для эталонного вещества $GWP = 1$ при любом выборе временного горизонта для оценки воздействия. В качестве эталонного вещества принимается CO_2 .

Наиболее современные оценки времени жизни, радиационной эффективности и потенциалов глобального потепления для различных парниковых газов приведены в Пятом оценочном докладе МГЭИК (Myhre et al, 2013). 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^{28} используются, в частности, для приведения выбросов остальных парниковых газов, кроме CO_2 , к выбросам CO_2 . Имея в виду эквивалентность возникающего радиационного воздействия, соответствующая единица измерения выбросов называется CO_2 -эквивалентом (далее - $CO_{2-экв.}$). Например, (см. табл. 7.1) **$1 \text{ Мт}(CH_4) = 28 \text{ Мт}(CO_{2-экв.})$** , а **$1 \text{ Мт}(N_2O) = 265 \text{ Мт}(CO_{2-экв.})$** . Эти значения показывают, что радиационные последствия выброса в атмосферу единицы массы (скажем, 1 т) CO_2 на порядок меньше, чем для метана, и на два порядка, чем для закиси азота. Однако, CO_2 все же остается самым важным антропогенным парниковым газом в силу гораздо больших объемов современных выбросов.

²⁸ По умолчанию используется временной горизонт 100 лет, если не оговорено иное.

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 вещества	Химическая формула	Время жизни, годы	Радиационная эффективность ²⁹ , Вт м ⁻² ppb ⁻¹	AGWP, (горизонт 20 лет) Вт м ⁻² год кг ⁻¹	GWP (горизонт 20 лет)	AGWP, (горизонт 100 лет) Вт м ⁻² год кг ⁻¹	GWP (горизонт 100 лет)
Углекислый газ	CO ₂	-	$1,37 \cdot 10^{-05}$	$2,49 \cdot 10^{-14}$	1	$9,17 \cdot 10^{-14}$	1
Метан	CH ₄	12,4	$3,63 \cdot 10^{-04}$	$2,09 \cdot 10^{-12}$	84	$2,61 \cdot 10^{-12}$	28
Закись азота	N ₂ O	121	$3,00 \cdot 10^{-03}$	$6,58 \cdot 10^{-12}$	264	$2,43 \cdot 10^{-11}$	265

²⁹ Здесь в оригинале радиационное воздействие пересчитано из Втм⁻² кг⁻¹ в Втм⁻² ppb⁻¹, исходя из пропорциональности общего содержания вещества и ему соответствующего объемного отношения смеси.

7.2. Потенциал изменения глобальной температуры

«Потенциал изменения глобальной температуры» (Global Temperature change Potential, далее - GTP) – метрика, которая по своему замыслу призванная играть большую роль в прикладных оценках воздействий по сравнению с GWP (Shine et al., 2005).

«Абсолютный потенциал изменения глобальной температуры» (Absolute Global Temperature change Potential, далее - 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^{30} »*.

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

- «абсолютный потенциал изменения глобальной температуры» - см. приведенное выше определение, и

- соответствующая относительная величина, «потенциал изменения глобальной температуры», 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 $[0, T_H]$, исходя из интегрального для всего этого промежутка эффекта – возникающего радиационного воздействия, AGTP (и GTP) оценивает последствие только для температуры в конечный момент времени T_H .

³⁰ Момент выброса s может предшествовать моменту t , для которого делается оценка, или же совпадать с ним.

Как и для GWP, метрика GTP предназначена для получения оценок эмиссий различных парниковых газов в CO₂-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 (Shine et al., 2007) 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 (Berntsen, Fuglestvedt, 2008; Peters et al., 2011b; Shindell et al., 2011). В табл. 7.2 приведены оценки потенциал 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 (Muyhre et al, 2013).

Название вещества	Химическая формула	AGTP (горизонт 20 лет) К кг ⁻¹	GTP (горизонт 20 лет)	AGTP (горизонт 50 лет) К кг ⁻¹	GTP (горизонт 50 лет)	AGTP (горизонт 100 лет) К кг ⁻¹	GTP (горизонт 100 лет)
Углекислый газ	CO ₂	6,84 · 10 ⁻¹⁶	1	6,17 · 10 ⁻¹⁶	1	5,47 · 10 ⁻¹⁶	1
Метан	CH ₄	4,62 · 10 ⁻¹⁴	67	8,69 · 10 ⁻¹⁵	14	2,34 · 10 ⁻¹⁵	4
Закись азота	N ₂ O	1,89 · 10 ⁻¹³	277	1,74 · 10 ⁻¹³	282	1,28 · 10 ⁻¹³	234

8. Климатическая роль антропогенных выбросов метана по сравнению с другими парниковыми газами

Средняя глобальная концентрация метана в приповерхностном слое атмосферы в 1750 г. оценивается как 722 ± 25 ppb (Etheridge et al., 1998; Dlugokencky et al., 2005), а в 2011 г. она достигла 1803 ± 2 ppb (Hartmann et al, 2013, p. 167). С высокой достоверностью это увеличение концентрации – следствие антропогенных эмиссий в ходе хозяйственной деятельности.

В 2011 г. по отношению к 1750 г. радиационное воздействие метана составило $0,48$ Вт м⁻², а совокупное радиационное воздействие всех хорошо перемешанных газов (well-mixed gases) составило $2,83$ Вт м⁻². (Myhre et al, 2013, p. 677, section 8.3.2).

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 CO₂, CH₄, N₂O и других хорошо перемешанных парниковых газов в 1850-2011 гг. В настоящее время метан является вторым после CO₂ в ряду по значению радиационного воздействия.

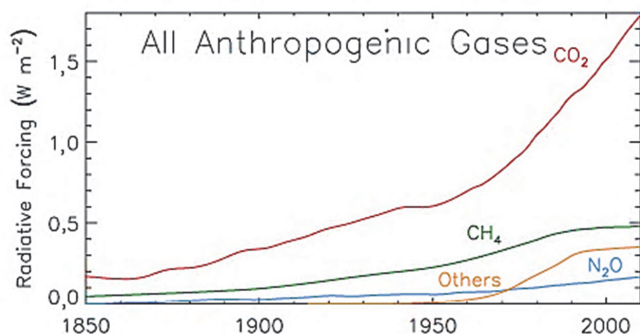


Рисунок 8.1 - Радиационное воздействие CO₂, CH₄, N₂O и других хорошо перемешанных газов в 1850-2011 гг., Вт м⁻² (Myhre et al, 2013, p. 677).

CO₂ – красная линия, CH₄ – зеленая линия, N₂O – голубая линия, прочие – оранжевая линия. По оси абсцисс приведено радиационное воздействие, по оси ординат – годы.

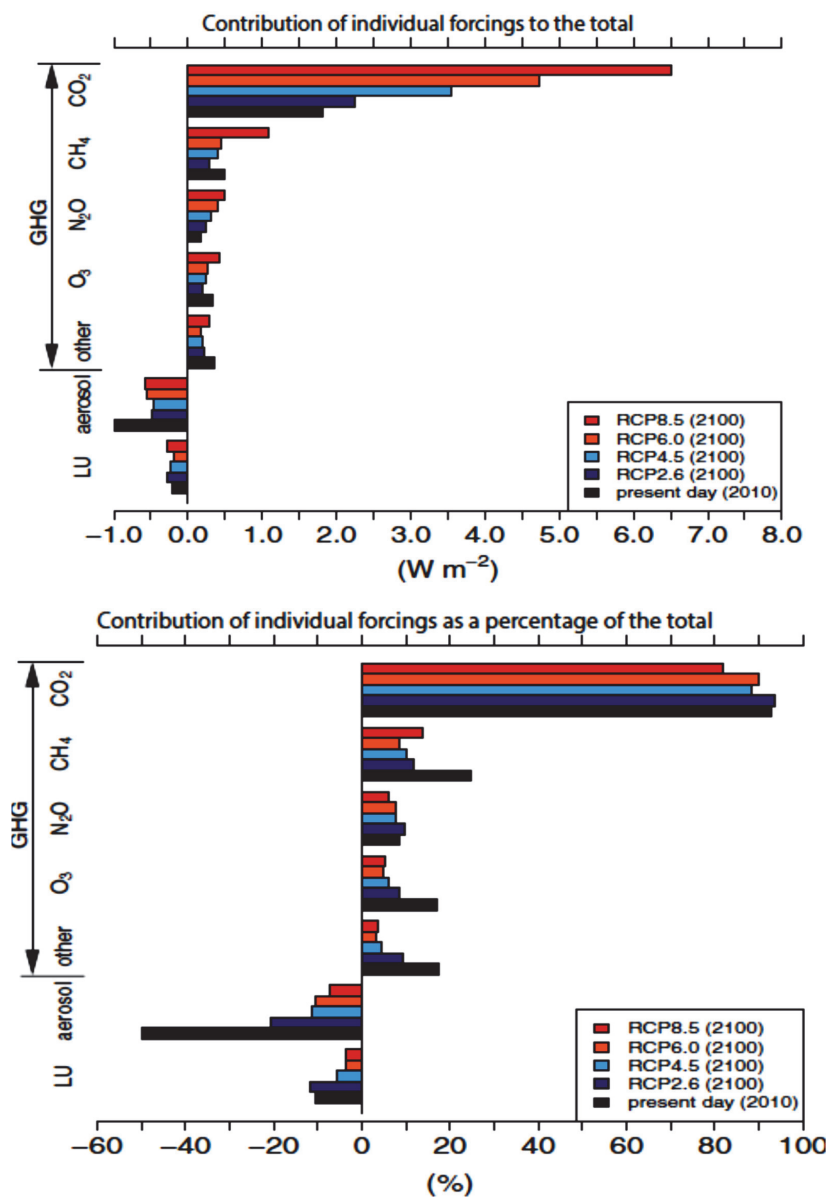


Рисунок 8.2 - Вклады различных парниковых веществ – CO₂, CH₄, N₂O, O₃, других парниковых газов и аэрозолей – в суммарное радиационное воздействие ($Вт м^{-2}$) с начала индустриальной эры до 2100 г. в условиях четырех сценариев RCP и в 2010 г (Meinshausen, 2011; Collins et al, 2013, p. 1046).

Верхняя панель – абсолютные величины, нижняя панель – проценты (%) от суммарного радиационного воздействия

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 (Meinshausen, 2011). Расчеты выполнены в условиях четырех сценариев RCP для 2100 г. и для 2010 г.

Заметим, что современный вклад метана оценивается примерно в 23%, что несколько выше приведенной ранее 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 условиях сценариев RCP 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 изменения 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°C .

Таблица 8.1 - Аномалия ΔT средней температуры ($^{\circ}\text{C}$) 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 σ 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 $\pm$ 0,3 [0,4-1,6]	1,4 $\pm$ 0,3 [0,9-2,0]	1,3 $\pm$ 0,3 [0,8-1,8]	2,0 $\pm$ 0,4 [1,4-2,6]
2081-2100	1,0 $\pm$ 0,4 [0,3-1,7]	1,8 $\pm$ 0,5 [1,1-2,6]	2,2 $\pm$ 0,5 [1,4-3,1]	3,7 $\pm$ 0,7 [2,6-4,8]
Суша:				
2081-2100	1,2 $\pm$ 0,6 [0,3-2,2]	2,4 $\pm$ 0,6 [1,3-3,4]	3,0 $\pm$ 0,7 [1,8-4,1]	4,8 $\pm$ 0,9 [3,4-6,2]
Океан:				
2081-2100	0,8 $\pm$ 0,4 [0,2-1,4]	1,5 $\pm$ 0,4 [0,9-2,2]	1,9 $\pm$ 0,4 [1,1-2,6]	3,1 $\pm$ 0,6 [2,1-4,0]
Тропики:				
2081-2100	0,9 $\pm$ 0,3 [0,3-1,4]	1,6 $\pm$ 0,4 [0,9-2,3]	2,0 $\pm$ 0,4 [1,3-2,7]	3,3 $\pm$ 0,6 [2,2-4,4]
Арктика:				
2081-2100	2,2 $\pm$ 1,7 [-0,5-5,0]	4,2 $\pm$ 1,6 [1,6-6,9]	5,2 $\pm$ 1,9 [2,1-8,3]	8,3 $\pm$ 1,9 [5,2-11,4]

9. Возможности сокращения выбросов метана в атмосферу от антропогенных источников

Оценки глобальных антропогенных выбросов парниковых газов в прошлом и различные сценарии их выбросов в XXI веке показывают, что без принятия специальных мер, выбросы метана с течением времени могут заметно возрасти (см. табл. 4.2 и раздел 6). Для их сокращения рассматривается возможность разработки и применения специальных мер сокращения выбросов, включающих:

- снижение углеродоемкости экономики путем развития аналогичных низкоуглеродных секторов (или технологий), например, для замены угольных электростанций на ветровые или атомные;
- повышение энергоэффективности и снижение ресурсоемкости экономики, что приведет к снижению выбросов от источников CH_4 , связанных с этими ресурсами (например, углеводородного ископаемого топлива) или отходами;
- 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 (IPCC, 2007; IPCC, 2014; GMI, 2015; EPA, 2013).

Внедрение различных способов снижения выбросов требует значительных экономических затрат, при этом реальное сокращение эмиссии парниковых газов может быть незначительным. Поэтому их внедрение является не всегда возможным и целесообразным. Однако, так как сокращение выбросов CH_4 может обойтись относительно недорого по сравнению со снижением выбросов CO_2 , в настоящее время некоторые такие проекты активно обсуждаются и реализуются в разных странах.

Как уже обсуждалось в предыдущих разделах, сокращение выбросов таких относительно короткоживущих парниковых веществ, как метан, может эффективно препятствовать изменению климата. При этом из всех

таких веществ, CH_4 обладает наибольшим потенциалом снижения. Для него существуют экономически эффективные технологии снижения выбросов для различных антропогенных источников.

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 АОС США (EPA, 2012).

В анализе исследовалось применение различных технологий снижения выбросов 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 долларах³¹ за 1 т CO_2 -экв.³², когда затраты на плату за выбросы парниковых газов и расходы на их снижение совпадают.

Антропогенные источники выбросов метана довольно разнообразны (см. табл. 4.1 и 4.2). Соответственно, пути и возможности сокращения выбросов CH_4 для них будут отличаться. Далее рассмотрены только отрасли, отмеченные высоким потенциалом сокращения выбросов метана, который можно реализовать со сравнительно небольшими затратами (GMI, 2015; EPA, 2013). Технически достижимый потенциал сокращения выбросов CH_4 и затраты на его внедрение для разных отраслей экономики приведены в табл. 9.1.

³¹ Здесь и далее «доллар» означает доллар США.

³² В расчетах (EPA, 2013) использован потенциал глобального потепления для метана, равный 21, т.е. на 1 т CO_2 -экв. приходится около 0,05 т CH_4 .

Таблица 9.1 - 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 CO ₂ -экв., доллары США*					Выбросы в 2030 г., Мт 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%

Примечание:

* - При пересчете был использован GWP для метана, равный 21, т.е. на 1 тCO₂-экв. приходится около 0,05 тCH₄.

Сельское хозяйство (обращение с навозом). Общий потенциал сокращения выбросов от этого сектора составляет 28% от базового уровня 2030 года. Затраты на снижения выбросов в промежутке от 3 до 10% составляют соответственно от 15 до 30 долларов за т CO₂-экв.. Однако, в данном секторе применение более дорогостоящих мер (от 60 долларов за т CO₂-экв.) не дает значительных дополнительных преимуществ в сокращении выбросов, так как дает дополнительно менее 5% сокращения выбросов.

Нефтегазовая промышленность. Этот сектор предоставляет наибольшие быстро реализуемые возможности в плане сокращения выбросов CH₄ с потенциалом снижения эмиссий в 35% в результате мероприятий, не требующих затрат. Глобальный потенциал сокращения выбросов в секторе может составить до 44 и 49 Мт (CH₄) в 2020 и 2030 годах, соответственно (что составляет 58% от общего объема выбросов в сценарии BAU за каждый год). Почти 70% этого потенциала можно достичь при ценах ниже 5 долларов США за т CO₂-экв.. Кроме того, более 61% сокращения (30 Мт (CH₄) 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 т $\text{CO}_2\text{-экв.}$ может дать дополнительные 5% сокращения эмиссий, а достижение оставшихся 11% для получения максимального значения сокращения требует затрат свыше 60 долларов США. Основой для оценки затрат для этих расчетов послужили меры по снижению выбросов метана, задокументированные программой US EPA Natural Gas STAR. Результаты расчетов финансовой применимости разных технологий снижения выбросов метана для разных стран и регионов и их эффект приведены в табл. 9.2.

Угледобывающая промышленность. Общий потенциал снижения выбросов в этом секторе (для подземной добычи угля), составляет примерно 60% от всего объема ежегодных выбросов в 2030 году. Максимальный потенциал сокращения выбросов в отрасли составляет 19 и 22 Мт (CH_4) в 2020 году и 2030 году, соответственно. Свыше 56% всего возможного сокращения выбросов (что составляет почти весь возможный потенциал сокращения) можно достичь при увеличении цены от 0 до 15 долларов за т $\text{CO}_2\text{-экв.}$ После этого возможности снижения будут продолжать оставаться на одном уровне, несмотря на увеличение средств на проведение таких мер. Кроме того, приблизительно 4 Мт (CH_4) сокращений являются экономически эффективными при текущих ценах на энергию (т. е. без дополнительных затрат).

Отходы. Глобальный потенциал сокращения выбросов метана в секторе захоронения твердых бытовых отходов составляет приблизительно 28 Мт (CH_4) 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 т $\text{CO}_2\text{-экв.}$ Далее при росте затрат их эффективность в отношении сокращения выбросов будет уменьшаться – при росте затрат в расчете на Мт ($\text{CO}_2\text{-экв.}$) на 10% выброс будет сокращаться на 1%. Однако, с затратами более 60 долларов за т $\text{CO}_2\text{-экв.}$ существует возможность добиться сокращения выбросов дополнительно еще на 30%. Кроме того, существует приблизительно от 3 до 4 Мт (CH_4) сокращений, которые являются экономически эффективными по текущим ценам на энергоносители.

Таблица 9.2 – Потенциал снижения выбросов в $\text{Mt}(\text{CH}_4)$ в нефтегазовом секторе по отдельным странам и регионам при разных углеродных ценах в 2030 году.

Страна (регион)/ Безубыточная цена (\$/т $\text{CO}_{2\text{-экв.}}$)*											
	-10	-5	0	5	10	15	20	30	50	100	100+
<i>Ведущие добывающие страны</i>											
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
<i>Остальные регионы</i>											
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
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

Примечание:

* - В расчетах (ЕРА, 2013) использован потенциал глобального потепления для метана 21, т.е. на 1 т $\text{CO}_{2\text{-экв.}}$ приходится около 0,05 т(CH_4).

Сточные воды. Общий потенциал сокращения выбросов метана в секторе очистки сточных вод— 36% от базового уровня выбросов 2030 г., что составит 10 Мт (CH₄). 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 т CO₂-экв. При затратах 60 долларов за т CO₂-экв. 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 отсутствии применения описанных технологий снижения выбросов в период с 2015 по 2020 гг. суммарные выбросы CH₄ 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. 9.1).

В целом по всем этим отраслям потенциал сокращения выбросов метана от уровня выбросов 2030 года без дополнительных финансовых затрат составляет примерно 45 Мт (CH₄). При увеличении затрат до 60 долларов за т CO₂-экв. 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. 9.3.

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 CH₄ от других парниковых газов является его отнесение в некоторых странах (в том числе в 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, CH_4 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 являются возобновляемым источником энергии. Производство энергии из этого CH_4 дает возможность отказаться от применения других энергоносителей с высокой степенью выбросов CO_2 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 CH_4 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 STAR³³ и др).

³³ 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).

Таблица 9.3 - Основные возможности для снижения выбросов CH_4 в различных секторах (GMI, 2015).

Источники метана	Технологии снижения выбросов
Нефть и газ Выбросы CH_4 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.	- Внедрение инспекционных и ремонтные программ для снижения вентиляционных выбросов или утечек газа из оборудования; - Модернизация технологий и оборудования для снижения или полного прекращения вентиляционных выбросов или утечек газа из оборудования; - Оптимизация технического обслуживания и модернизация оборудования для проведения более точных измерений и контроля выбросов метана или сопутствующих параметров; - Применение систем сбора метана и утилизация метана, в том числе в составе попутного нефтяного газа.
Угольные шахты Метан выделяется из действующих и заброшенных подземных угольных шахт и открытых карьеров, в результате последующей деятельности при добыче угля - переработке, хранении и перевозке.	- Дегазация угольных пластов (путем бурения скважин для сбора метана при эксплуатации шахт) и его дальнейшая утилизация или использование; - Утилизация метана при его низкой концентрации в выбросах вентиляционных установок для производства тепла и электроэнергии.

Источники метана	Технологии снижения выбросов
Бытовые отходы Выделение CH_4 в процессе разложения органических отходов в анаэробных условиях, которые являются типичными для объектов захоронения отходов.	- Рекуперация метана в составе биогаза из объектов захоронения отходов 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 для других нужд.
Обращение с навозом (сельское хозяйство) Метан 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).	- Сбор выделяемого метана в составе биогаза в закрытых анаэробных отстойниках и резервуаров для его дальнейшей утилизации путем сжигания (в том числе для получения электроэнергии) или использования; - Использование для обработки навоза метантенков, компостирующих органические отходы в бескислородной среде и выделяющих биогаз, пригодный для сбора и дальнейшего применения для производства электроэнергии (путем сжигания), топлива или для других нужд.

10. Заключение

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 CO_2 , метаном CH_4 , закисью азота N_2O 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 в приповерхностном слое выросла на $0,85^\circ\text{C}$, и большая часть этого потепления связана с антропогенным усилением парникового эффекта. Это потепление неравномерно: на суше оно происходит более активно в сравнении с океаном, а некоторые участки суши, в свою очередь, теплеют сильнее, чем суша в среднем. Последствия такого потепления сказываются на природных и социально-экономических системах, а также здоровье населения, что вызывает обеспокоенность в общественных, научных и правительственных кругах многих стран. В особенности вызывает тревогу, 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.

Среди трех основных парниковых газов – CO_2 , CH_4 и N_2O – в расчете на равные количества выбросов каждого вещества наибольшее влияние на климатическую систему оказывает закись азота N_2O , *следующий по эффекту – метан CH_4* , и далее углекислый газ CO_2 . И по влиянию на среднюю температуру в приповерхностном слое заданного малого длительного увеличения концентрации парникового газа в атмосфере (в единицах объемного отношения смеси, млн^{-1} , например) - на первом месте N_2O , *затем CH_4* , затем CO_2 .

Однако в абсолютном выражении наиболее важным парниковым газом является и скорее всего будет оставаться в XXI веке 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, но все же последствия увеличения его глобальных концентраций для климатической системы заметны. В 2011 г. радиационное воздействие основных парниковых газов на климатическую систему Земли следующее: CO_2 1,82 (1,63-2,01) Вт м^{-2} , **CH_4 0,48±0,05 Вт м^{-2}** , N_2O 0,17±0,03 Вт м^{-2} . Суммарное радиационное воздействие всех парниковых газов составило 2,83 (2,54-3,12) Вт м^{-2} . На долю метана при этом приходится 17%.

Современный естественный глобальный выброс метана составляет 220-350³⁴ Мт (CH_4) год⁻¹, причем от 60 до 80% - вклад заболоченных территорий. Его основные источники: заболоченные территории, различные водные объекты (озера, реки, моря и океаны), пожары, ферментация корма в желудке диких жвачных животных и насекомых, оттаивающая многолетняя мерзлота, метангидраты, месторождения углеводородов, некоторые другие глубинные геологические источники.

Современный антропогенный глобальный выброс метана оценивается в 330-335³⁵ Мт (CH_4) год⁻¹, что составляет около половины от его общей эмиссии в атмосферу. Основными источниками этих выбросов являются жвачные сельскохозяйственные животные, отходы и сточные воды, а также использование ископаемого топлива.

При этом следует отметить, что, к сожалению, многие процессы, ведущие как к естественным, так и антропогенным выбросам CH_4 , ещё недоста-

³⁴ Данные МГЭИК (IPCC, 2013) для 2000-2009 гг. при оценке методами «сверху вниз» и «снизу вверх».

³⁵ Данные МГЭИК (IPCC, 2013) для 2000-2009 гг. при оценке методами «сверху вниз» и «снизу вверх».

точно изучены и зависят от многих факторов, что в итоге может приводить к заметным расхождениям в оценках разных авторов за разные годы.

Время жизни метана в атмосфере составляет 12,4 года. Он безвозвратно расходуется главным образом в реакциях с гидроксидом (в основном в тропосфере) и атомарным хлором (в основном в стратосфере). Наземный сток метана из атмосферы незначителен. Реалистичной технологической возможности ускорить сток метана из атмосферы пока 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 , а метан CH_4 играет заметную, но лишь второстепенную роль.

Список литературы

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

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

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

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

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

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.

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

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

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.

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 – Загл. с экрана. – Яз. рус.

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 – Загл. с экрана. – Яз. рус.

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.

Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. СПб, Гидрометеиздат, 2000, 778 с.

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

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 – Загл. с экрана. – Яз. рус.

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

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/> – Загл. с экрана. – Яз. рус.

Правительство РФ, 2016a. Распоряжение от 14.04.2016 г. № 670-р – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://government.ru/docs/22726/> – Загл. с экрана. – Яз. рус.

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

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.

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

Стокер Т.Ф., Цинь Д., Платтнер Дж.-К., Александер Л. В., Аллен С. К., Биндофф Н. Л., Бреон Ф.-М., Черч Дж. А., Кубаш У., Эмори С., Форстер П., Фридлингштайн П., Жиллетт Н., Грегори Дж. М., Хартманн Д. Л., Янсен Э., Киртман Б., Кнутти Р., Кришна Кумар К., Лемке П., Мароцке И., Массон-Дельмотт В., Михль Дж. А., Мохов И. И., Пьяо Ш., Рамасвами В., Рэндалл Д., Рейн М., Рохас М., Сабин К., Шиндел Д., Толлей Л. Д., Воан Д. Г., Се Ш.-П., 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.

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.

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.

Barnola J.M., Raynaud D., Lorius C., Barkov N. I. Historical CO₂ 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/>>

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.

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> - Загл. с экрана. - Яз. англ.

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.

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.

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.

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 CH₄ mole fractions to a gravimetrically prepared standard scale. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 110, doi:10.1029/2005JD006035 .

EPA, 2012. Global Mitigation of Non-CO₂ Greenhouse Gases US EPA, 2013, – 410 pp.

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.

EPA, 2012. Summary report: Global anthropogenic Non-CO₂ 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.

Etheridge D.M., Steele L.P., Francey R.J., Langenfelds R.L. 2002. Historical CH₄ Records Since About 1000 A.D. From Ice Core Data. U.S. DOE Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge, TN.

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.

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.

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.

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> - Загл. с экрана. - Яз. Англ., рус.

HLA CCAC, 2016. The Marrakech Communiqué - Электрон. дан. - Режим доступа: <http://ccacoalition.org/en/resources/marrakech-communiqué> - Загл. с экрана. - Яз. англ.

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.

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.

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

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,

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.

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.

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.

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.

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. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA; 2014, -1419 pp.

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.

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.

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.

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.

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.

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., Krummel 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.

Kirtman, B., S.B. Power, J.A. Adedoyin, G.J. Boer, R. Bojariu, I. Camillo-ni, 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.

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.

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.

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.

Louergue L., Schilt A., Spahni R., et al. Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH₄ over the past 800,000 years // *Nature*. 2008. V. 453. P. 383-386.

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.

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

Myhre G., Shindell D., Bréon F.-M., Collins W., Fuglestad 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.

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>

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.

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

Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.-M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davis M., Delaygue 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.

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.

Prinn R. G., Weiss R. F., Fraser P. J., Simmonds P. G., Cunnold D. M., Alyea 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>.

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).

Saunois, M., Bousquet, P., Poulter, B., Peregon, A., Ciais, P., Canadell, J. G., 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., Krummel, 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.

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.

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

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.

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.

Spahni R., Chappelaz J., Stocker T. F., Loulergue L., Hausammann G., Kamamura K., Fluckiger J., Schwander J., Raynaud D., Masson-Delmotte V., Jouzel J. 2005. Atmospheric Methane and Nitrous Oxide of the Late Pleistocene from Antarctic Ice Cores. *Science* 310, 1317-1321.

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.

The HITRAN molecular spectroscopic database and HAWKS (HITRAN Atmospheric Workstation): 1996 edition.// J. Quant. Spectrosc. Radiat. 1998. V. 60. N 5. P. 665-710.

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.

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

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

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

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.

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/m² RCPP Evaluation Panel. Geneva, Switzerland: IPCC Secretariat, 2009.

РОЛЬ МЕТАНА
В СОВРЕМЕННОМ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА

С.М. Семенов, И.Л. Говор, Н.Е. Уварова
Москва, 2018

Подписано в печать 06.09.2018

ISBN 978-5-9631-0687-7

Отпечатано в соответствии с предоставленными материалами
в ООО "Принт". г.Ижевск, ул. Тимирязева, 5. Заказ 2420.