

**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ (РОСГИДРОМЕТ)**

КЛИМАТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР РОСГИДРОМЕТА



А. А. Киселёв, И. Л. Кароль

С МЕТАНОМ ПО ЖИЗНИ

Санкт-Петербург, 2019 г.

УДК 551.510.41
ББК 20.1
К44

Киселев Андрей Александрович, Кароль Игорь Леонидович. С метаном по жизни. – Санкт-Петербург: Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова. 2019. – 73 с.: ил. ISBN 978-5-9500883-7-7

I. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. II. Климатический центр Росгидромета.

Мир живёт в условиях интенсивно меняющегося климата. Его изменения обусловлены ростом содержания в атмосфере парниковых газов. Метан — второй по значимости парниковый газ, размеры выбросов которого в атмосферу в значительной степени зависят от хозяйственной деятельности человека. Что сегодня известно о метане? В какой степени люди могут контролировать его попадание в атмосферу? Как, вероятно, будет развиваться ситуация в обозримом будущем? Узнать об этом можно на страницах данной книги.

ISBN 978-5-9500883-7-7

© Климатический центр
Росгидромета,
Федеральное государственное
бюджетное учреждение
Главная геофизическая
обсерватория им. А. И. Воейкова
ФГБУ «ГГО».
2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	4
Визитная карточка метана.....	7
Парниковый эффект: друг или враг?.....	10
Как они это делают?.....	13
Мы его теряем... ..	21
... и обретаем	25
Где и как измеряют атмосферный метан.....	40
И вот что получилось.....	46
Что век текущий нам готовит?.....	54
Заключение.....	64
Список литературы.....	66

Предисловие

Легко представить недоумение читателя: «Метан?! Неужели он сто́ит того, чтобы посвящать ему целую книгу?» А действительно, сто́ит ли?

В спорте существует термин «вечно второй». Так называют сильного спортсмена, которому всегда чего-то — характера, мастерства, удачи — не хватает, чтобы стать не призёром, а именно чемпионом. Называют, отдавая должное, но в то же время и с некоторой толикой пренебрежения. Что поделаешь — люди любят победителей. В иерархии антропогенных парниковых газов, определяющих современные изменения климата, метан как раз — «вечно второй». Неудивительно, что при обсуждении климатической тематики интерес создающих информационный фон СМИ обращён к «лидеру», то есть к углекислому газу. О метане же, как правило, упоминают лишь вскользь, по остаточному принципу. Поэтому у читателей-неспециалистов при слове «метан» возникают ассоциации скорее с угледобычей и взрывами на шахтах (там он, увы, «на первых ролях»), нежели с его вкладом в глобальное потепление. Разумеется, неуместно сравнивать последствия столь разных по своим масштабам и драматичности событий, и здесь мы сосредоточимся исключительно на последствиях климатических. К тому есть все основания: ведь с ростом содержания метана (и углекислого газа, конечно, тоже) в атмосфере происходит не только её разогрев, но с большой долей вероятности также учащение погодных аномалий: ураганов, засух, сильных ливней и других опасных явлений. А это, согласитесь, в той или иной степени затрагивает каждого из нас.

Возможно, кому-то покажется парадоксальным, но ключевую роль в борьбе с глобальным потеплением специалисты отводят метану, а не углекислому газу. Дело в том, что по крайней мере половина эмиссии метана в атмосферу обусловлена хозяйственной деятельностью человека, а, значит, может контролироваться с помощью национальных и международных соглашений-ограничений, в то время как антропогенный вклад в баланс углекислого газа оценивается лишь в несколько процентов. Также в пользу метана говорит и тот факт, что он химически значительно активнее углекислого газа, вследствие этого время их пребывания в атмосфере оценивается в 9—10 и примерно 100 лет соответственно. Другими словами, попавшие в атмосферу

молекулы углекислого газа будут творить своё «разогревающее» дело в 10 раз дольше, чем молекулы метана. Последнее обстоятельство порождает надежду на то, что, если удастся обуздать выбросы метана в атмосферу, желанный климатический отклик произойдёт существенно раньше, чем в случае, когда антипарниковые меры будут сосредоточены главным образом на углекислом газе. Поэтому неслучайно в 2012 г. была создана Коалиция, поддержанная государствами — членами «большой восьмёрки», а также рядом других стран, целью которой было проведение «быстрых» акций, направленных на смягчение процесса глобального потепления. Нетрудно догадаться, что среди таких акций достойное место заняли планы по сокращению выбросов метана в атмосферу. В целом же комплекс «быстрых» акций рассматривается как важное дополнение к международным ограничениям в рамках сперва Киотского, а позже Парижского соглашений по климату. При этом метан оказался единственным фигурантом во всех международных климатических договорах, рассчитанных как на оперативные действия, так и на долгосрочную перспективу.

Итак, вроде бы приоритеты расставлены, выбор сделан. Однако, как известно, между намерениями и их реализацией дистанция огромного размера. Судя по всему, в ближайшем будущем нам едва ли придётся услышать обоснованные победные реляции и ощутить на себе благотворное влияние мер, реализованных в борьбе с глобальным потеплением. Корни такого пессимистического прогноза кроются в целом ряде причин. Это и колоссальная инерционность климатической системы нашей планеты, и неготовность сегодня удовлетворять постоянно растущую потребность мировой экономики в энергии без традиционного использования ископаемого топлива, и значительная разнородность источников нашего героя — метана, «совладать» с которой ой как непросто... Несомненно, ни эти, ни какие-либо другие причины не отменяют необходимости скорейшего принятия и исполнения международных согласованных решений во имя смягчения негативных последствий изменений климата. Речь лишь о том, что эффект принятых мер не может проявиться быстро, а призван стать залогом «климатической комфортности» для будущих поколений. И в ряду таких мер сокращение антропогенных выбросов метана в атмосферу представляется одним из наиболее действенных и, несмотря на всё вышесказанное, осуществимых.

Очевидно, понимание роли метана в формировании изменений современного климата стало стимулом для его всестороннего изучения.

Но несмотря на разворачивание в последние годы мониторинга метана и комплекса сопутствующих теоретических исследований, многие вопросы до сих пор остаются без ответа, а оценки обладают очень большой погрешностью. И тому есть объективные причины!

Так что же сегодня известно о метане? Ниже мы постараемся рассказать об этом. И Вы, уважаемый читатель, если Вам хватит интереса и терпения дочитать книгу до конца, сможете ответить на вопрос, поставленный в начале предисловия.

Работа выполнена частично благодаря гранту РФФИ (грант № 18-05-00982).

Благодарности

Авторы признательны старшему научному сотруднику ФГБУ «ГГО» В. М. Ивахову за доброжелательные замечания, сделанные им по прочтении этой рукописи, а также за подготовку нескольких рисунков, и П. Н. Кондрашову, оказавшему большую помощь при подготовке иллюстративного материала.

Визитная карточка метана

Обычно информация о каком-либо химическом элементе (а также многих распространённых в природе газах и минералах) сопровождается сведениями о том, кем, когда и при каких обстоятельствах он был открыт. В нашем случае сделать это непросто, поскольку «знакомство» с метаном происходило в несколько этапов. Итальянский физик Алессандро Вольта в 1776 г. обнаружил метан в болотах озера Лаго-Маджоре на границе Италии и Швейцарии [1]*. Он собрал газ, выделяемый болотом, и в 1778 году получил чистый метан. При этом А. Вольта установил, что болотный газ отличается от открытого десятью годами раньше водорода, потому что при его сгорании образуется не водяной пар, а углекислый газ. Французский химик Клод Бертолле в 1785 году выяснил, что болотный газ состоит из углерода и водорода. Английский физик и химик Джон Дальтон в 1805 году рассчитал соотношение атомов углерода и водорода в этом газе. При этом в системе атомных масс Д. Дальтон предложил водород (масса равна 1) как основу и присвоил 6 единиц углероду и 8 — кислороду. Позже, когда было установлено, что некоторые элементы являются не одно-, а двухатомными (как кислород O_2 и водород H_2), метан обрёл свою современную химическую форму — CH_4 .

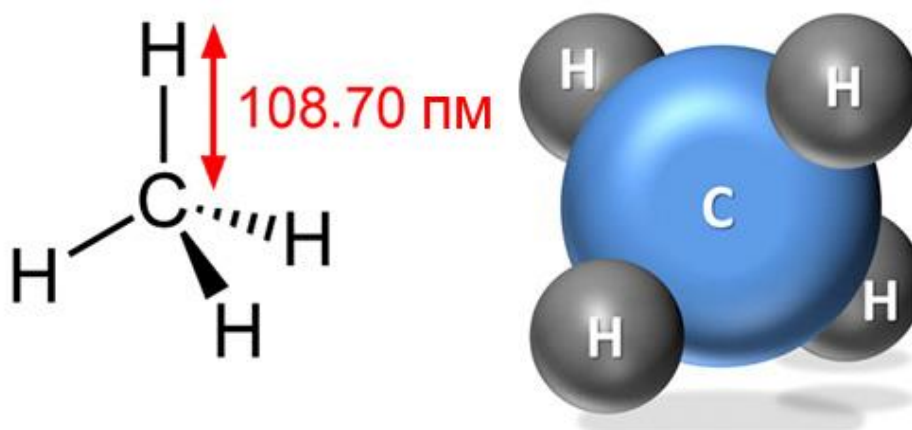
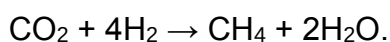


Рис. 1. Модель-схема молекулы метана (1 пм = 1×10^{-12} м).

* Здесь и ниже в квадратных скобках указаны ссылки на источники приводимой информации (список цитирования приведён в конце книги). Отметим, что для понимания излагаемого материала большинству читателей нет необходимости заглядывать в упомянутый список. Тем не менее, такой список будет полезен тем, кто захочет более подробно вникнуть в «метановую» проблему или предпочитает работать с первоисточниками.

Далее английский учёный-химик Хэмфри Дэви в 1808 г. обнаружил метан в биогазе, а в 1813 г. заключил из своих анализов, что рудничный газ есть смесь метана CH_4 с небольшим количеством азота N_2 и угольного ангидрида (или привычнее — углекислого газа) CO_2 — то есть, что он качественно тождественен по составу с газом, выделяющимся из болот. То есть болотный и рудничный газы по сути — синонимы метана, метан также является основным компонентом природного газа (77—99 %) и попутных нефтяных газов (31—90 %), присутствует в газах грязевых вулканов (более 95 %).

Существует несколько механизмов образования метана в естественных условиях. В соответствии с первым из них, метан вырабатывается и накапливается в недрах Земли, в среде, где гниение отмершей растительности происходит при дефиците свободного кислорода. Среди источников метана преобладают микробиологические процессы с участием анаэробных бактерий, которые могут быть выражены результирующей формулой:



Молекулярный водород для протекания этой реакции выделяется бактериями, не генерирующими метан, но развивающимися в той же самой среде. Метан продуцируют также высшие животные (в первую очередь, крупный рогатый скот), в кишечниках которых создаются оптимальные условия для существования микробов, выделяющих метан. По оценке Н. М. Бажина, «продуктивность» одной коровы составляет 250 л CH_4 (целая бочка!) в сутки [2]. Некоторое количество метана формируется как результат геохимических реакций в почве. Наконец, существует механизм образования метана, связанный с высокотемпературными ($\geq 110^\circ\text{C}$) реакциями в земной коре [3]. Нелишне добавить, что химическим путем в атмосфере метан не образуется, поскольку для генерирования его довольно сложных молекул необходимо большое количество энергии. Как следствие, атмосферные источники CH_4 отсутствуют и поступление метана в атмосферу полностью контролируется его потоками с земной поверхности.

Таким образом, классифицируя метан по его происхождению, можно выделить следующие группы метана:

- бактериальный или микробный (образованный в результате жизнедеятельности бактерий (микроорганизмов));

- абиогенный (образованный в результате химических реакций неорганических соединений);
- биогенный (образованный как результат химических превращений органических веществ);
- термогенный (образованный в ходе термохимических процессов).

Обычно концентрацию метана, как и прочих атмосферных газов, наряду с привычными единицами (число граммов или число молекул в одном кубическом сантиметре — $X \text{ г/см}^3$ или $Y \text{ мол./см}^3$), представляют как результат деления X или Y на число граммов или молекул воздуха в одном кубическом сантиметре соответственно. Такой результат деления называется отношением смеси. Ниже широко используется отношение смеси метана, исходящее из подсчёта числа молекул в кубическом сантиметре: $1 \text{ млн}^{-1} = 1 \times 10^{-6} \text{ мол./мол.}$ (ppm, parts per million (англ.)) и $1 \text{ млрд}^{-1} = 1 \times 10^{-9} \text{ мол./мол.}$ (ppb, parts per billion). Например, если в приземном слое в одном кубическом сантиметре содержатся $\sim 2 \times 10^{19}$ молекул воздуха и $3,6 \times 10^{13}$ молекул метана, то отношение смеси метана будет равно $3,6 \times 10^{13} / 2 \times 10^{19} = 1,8 \text{ млн}^{-1} = 1800 \text{ млрд}^{-1}$.

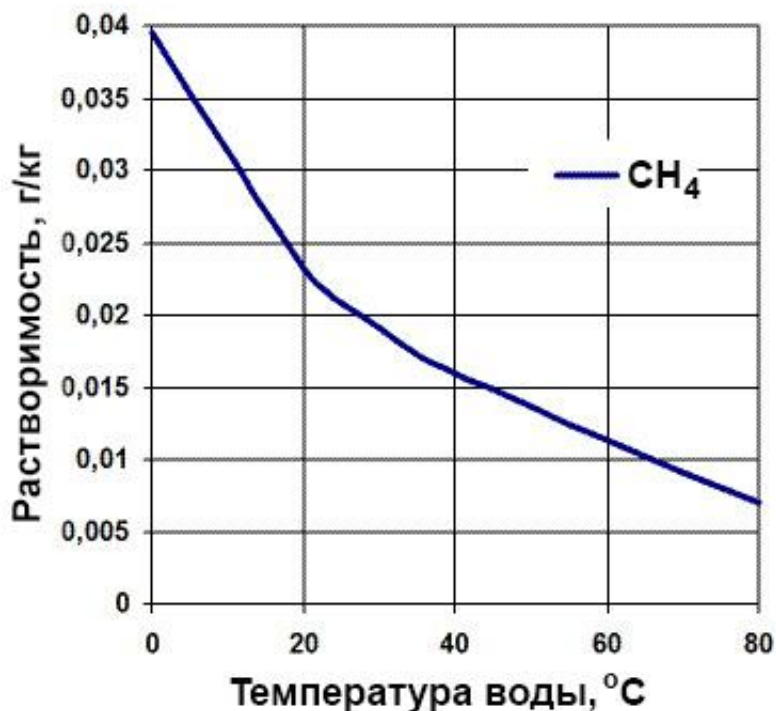


Рис. 2. Растворимость метана в воде (грамм газа на килограмм воды) [4].

Из общих характеристик упомянем те, которые связаны с нашей окружающей средой. Простейший углеводород метан — бесцветный газ без

запаха и вкуса, легче воздуха; он малорастворим в воде (0,02—0,04 г на кг воды, см. рис. 2). Накапливаясь в замкнутом пространстве, при концентрации в воздухе от 4,4 до 17 % метан становится взрывоопасен (наиболее взрывоопасна концентрация 9,5 %) [1].

И, разумеется, не забудем о главной причине повышенного интереса к нему среди специалистов: метан занимает второе место в иерархии антропогенных парниковых газов, ответственных за современное глобальное потепление**.

Парниковый эффект: друг или враг?

Так что же, парниковый эффект испортил климат Земли, как в знаменитом романе квартирный вопрос — москвичей? Совсем нет. Именно благодаря наличию в нашей климатической системе парникового эффекта, стало возможно возникновение жизни: согласно расчётам, при его отсутствии среднегодовая средняя по земному шару температура составляла бы минус 18 °С, то есть примерно на 33 градуса меньше наблюдаемой сегодня [6].

Напомним кратко, в чём заключается суть парникового эффекта. Земля получает энергию от Солнца по большей части в видимой области спектра, а излучает в космос, главным образом, инфракрасные (длинноволновые) лучи (см. рис. 3). Парниковые газы «прозрачны» для видимых лучей, но интенсивно поглощают испускаемые нагретой подстилающей поверхностью инфракрасные, удерживая тем самым в атмосфере часть тепла.



Рис. 3. Схема спектра электромагнитных волн ($1 \text{ нм} = 1 \times 10^{-9} \text{ м}$).

** Согласно документам Межправительственной Группы Экспертов по Изменению Климата (МГЭИК) [5], этот факт можно считать установленным с 95%-й достоверностью.

Поглощённая парниковым газом энергия длинноволнового излучения переизлучается вниз к поверхности и тем самым приводит к повышению температуры воздуха (парниковому эффекту, см. рис. 4).

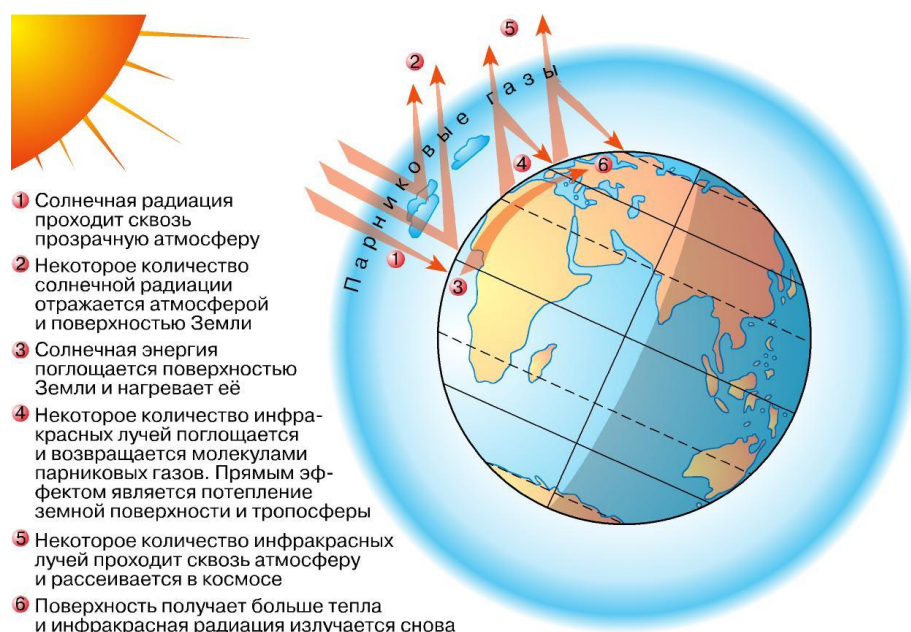


Рис. 4. Схема парникового эффекта в атмосфере [7].

При этом если среднегодовое количество приходящей от Солнца и уходящей от Земли энергии одинаково, то разогрева воздуха не происходит. Такая ситуация наблюдалась до наступления индустриальной эпохи. В последующем расширение и интенсификация хозяйственной деятельности человека привели к перманентному росту эмиссии парниковых газов в атмосферу и, как следствие, увеличению их атмосферной концентрации (см. рис. 5), а с ним и к резкому усилению парникового эффекта. Кроме того, в тёплом воздухе в результате испарения с поверхности растёт его влажность, а водяной пар — самый сильный парниковый газ*. Поглощение им длинноволнового излучения приводит к ещё большему повышению температуры воздуха, многократно усиливая таким образом парниковый эффект и делая его самым значительным среди всех других антропогенных климатоформирующих факторов.

* В отличие от углекислого газа и метана, имеющих как антропогенные, так и естественные источники (о чём будет рассказано ниже), водяной пар формируется исключительно в результате *естественного* круговорота воды в природе и потому не попадает в список антропогенных парниковых газов.

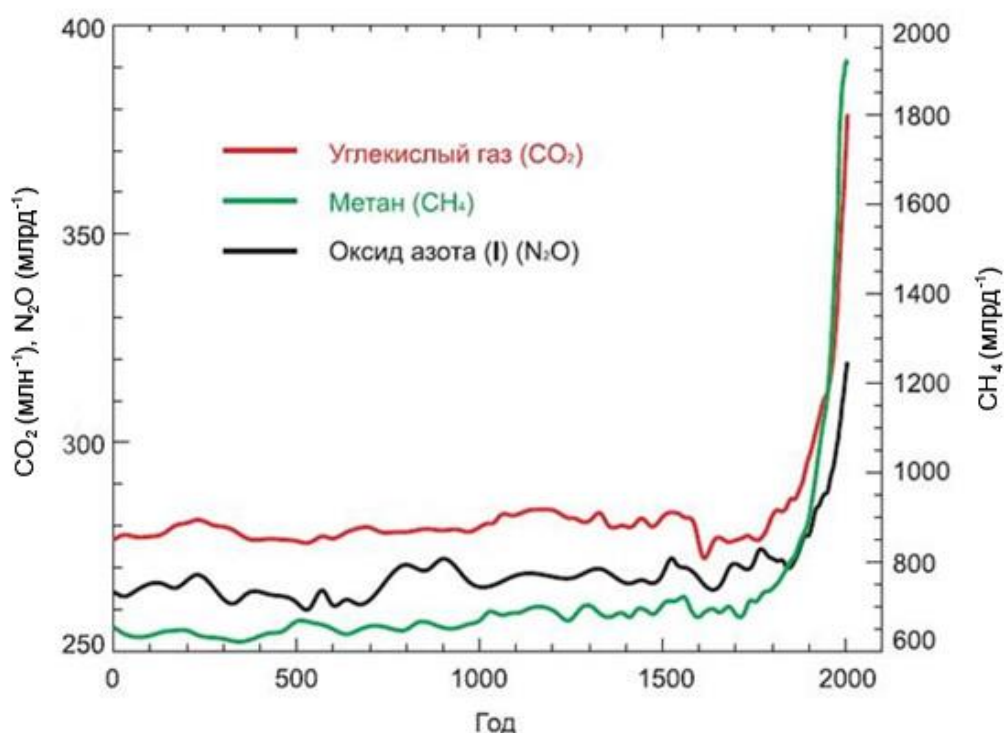


Рис. 5. Изменения содержания в атмосфере основных парниковых газов — CO_2 (млн^{-1}), CH_4 и N_2O (млрд^{-1}) в течение двух последних тысячелетий [8].

Обратимся к рисунку 6. В верхней его части показано, как распределяется по длинам волн спектра количество приходящей (солнечной) и уходящей (инфракрасной) радиации. На средней панели видно, какая часть радиации поглощается и рассеивается в атмосфере на этих волнах, а на нижней представлен вклад основных парниковых газов в это поглощение.

Сопоставление двух нижних панелей свидетельствует о том, что бо́льшая часть уходящей радиации поглощается водяным паром. Исключение составляет лишь участок 8—13 мкм, называемый обычно «окном прозрачности». В этой связи главным критерием значимости всякого другого парникового газа является его способность эффективно поглощать инфракрасное излучение внутри «окна прозрачности» или вблизи его границ. Предмет нашего повествования — метан — имеет полосы поглощения на длинах волн 3,3 и 7,7 мкм. «Благодаря» им метан ответственен за 4—9 % современного парникового эффекта (для сравнения: ответственность водяного пара, углекислого газа и озона оценивается в 36—70, 9—26 и 3—7 % соответственно [10]).

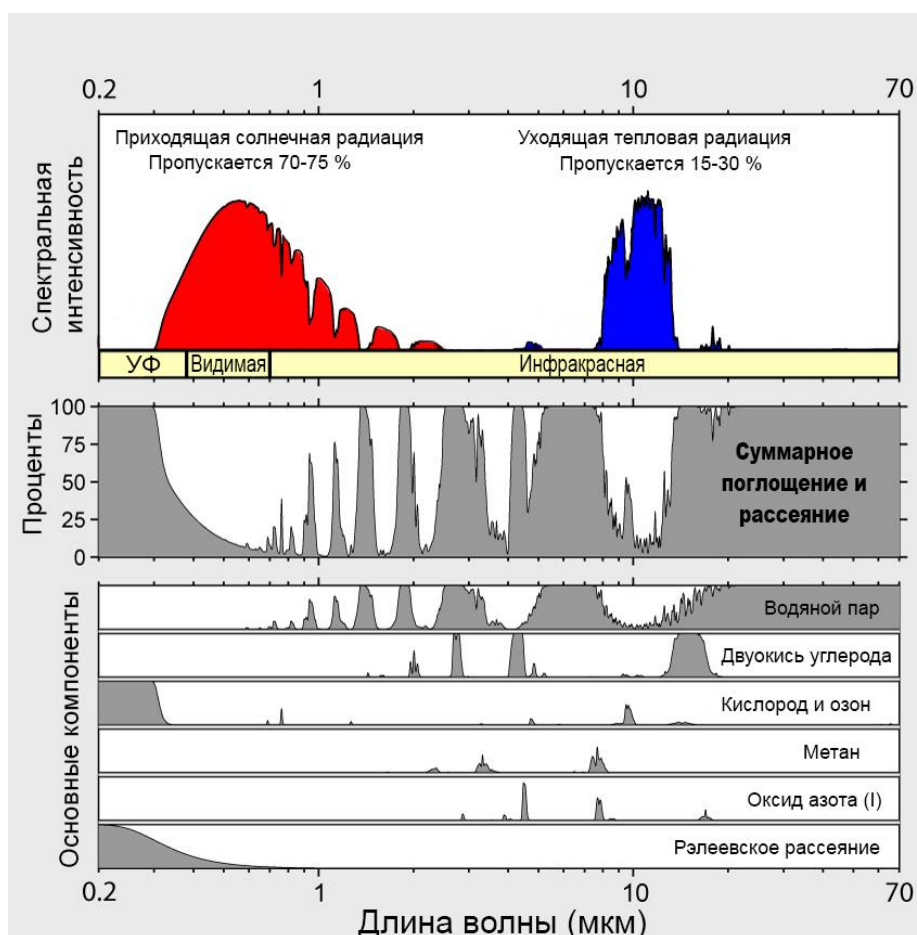


Рис. 6. Спектр поглощения радиации основными парниковыми газами и рэлеевского рассеяния атмосферными аэрозолями (1 мкм = 1×10^{-6} м) [9].

Резюмируем сказанное. Парниковый эффект присутствует в земной атмосфере с незапамятных времён, его благотворное влияние обеспечивает нам достаточно комфортное существование. Однако в последние столетия интенсивное развитие многих видов хозяйствования привело к всплеску роста содержания в атмосфере парниковых газов (и отчасти аэрозолей). Этот рост породил нарушение существовавшего ранее баланса между приходящей от Солнца и уходящей в космическое пространство радиацией и вызвал увеличение среднегодовой средней глобальной температуры воздуха в приземном слое атмосферы. Один из наиболее значимых вкладов в глобальное потепление вносит метан.

Как они это делают?

Все рассуждения о большей или меньшей лепте, вносимой каким-либо явлением или парниковым газом в глобальное потепление (а рассматривая шире

— в изменение климата), нуждаются в подтверждении с помощью объективных количественных критериев. Выбор таких критериев — крайне непростая задача: для этого нужно математически корректно описать многочисленные процессы, присущие такой сложной системе, как «Земля—атмосфера» (это и химические превращения, и перенос воздушных масс во всех направлениях, и смена фазовых состояний веществ, и испарение, и осадки и т. п.). Ещё сложнее удовлетворительно охарактеризовать состояние этой системы одним или несколькими числами. Для этого из всего комплекса процессов необходимо выделить *единственный*, подлежащий оценке, который к тому же должен иметь простую и наглядную интерпретацию, понятную не только специалистам, но и политикам, промышленникам, экономистам, журналистам.

В качестве такового был выбран баланс между приходящей и уходящей радиацией на уровне тропопаузы — границы между тропосферой и стратосферой, расположенной на высотах от 8 до 18 км в разных широтных зонах*. Как уже говорилось выше, если количество приходящей коротковолновой радиации в среднем за год равно количеству отданной в космос длинноволновой радиации, среднеглобальная температура остаётся практически неизменной. Если же температура стабильно год от года растёт, значит, радиационный баланс в чём-то нарушен. На этом постулате построен наиболее популярный у исследователей и, как следствие, основной критерий, называемый радиационным форсингом**.

Согласно общепринятому определению, радиационный форсинг описывается формулой:

$$RF = \Delta(t_2) - \Delta(t_1); \quad \Delta = [(I^\downarrow(h) - I^\uparrow(h)) - [S^\uparrow(h) - S^\downarrow(h)]],$$

где $I^\uparrow(h), I^\downarrow(h)$ — восходящий и нисходящий потоки ультрафиолетовой (солнечной) радиации, $S^\uparrow(h), S^\downarrow(h)$ — восходящий и нисходящий потоки

* Напомним, что в нижнем слое атмосферы, тропосфере, температура воздуха убывает с высотой, в то время как в вышележащей стратосфере она растёт. Таким образом, тропопауза является «местом перелома» вертикального профиля температуры.

** Название происходит от английского термина «Forcing» — воздействие. Поэтому в литературе, наряду с «радиационным форсингом», употребляют термин «радиационное воздействие». Во избежание путаницы ниже мы будем говорить «радиационный форсинг», когда речь идёт о числовой характеристике, но о радиационном воздействии при обсуждении атмосферных процессов (например, о воздействии радиации на химические превращения в атмосфере).

инфракрасной (длинноволновой) радиации, Δ — суммарный эффективный поток на уровне h . В качестве уровня h обычно выбирается тропопауза. Среди членов в квадратных скобках $I^\downarrow(h) \gg I^\uparrow(h)$ и $S^\uparrow(h) \gg S^\downarrow(h)$, однако меньшие члены, обусловленные процессами отражения и рассеяния радиации, отнюдь не пренебрежимы. Радиационный форсинг представляет собой разность суммарных эффективных потоков в два момента времени t_1 и t_2 . При этом первый момент времени (t_1) соответствует «невозмущённому» состоянию климатической системы, в том числе атмосферы, а второй (t_2) — тому моменту, когда «возмущающее» событие (например, извержение вулкана или удвоение атмосферной концентрации CO_2) уже состоялось. Другими словами, на уровне тропопаузы в среднем по земному шару всегда существует некоторый баланс между приходящей и уходящей радиацией; радиационный форсинг показывает, насколько изменится баланс при внесении «возмущения» по сравнению с «невозмущённым» состоянием климатической системы. На рисунке 7 показана немного упрощённая схема, иллюстрирующая понятие «радиационный форсинг». По существу, радиационный форсинг является аналогом широко используемой в математике частной производной.

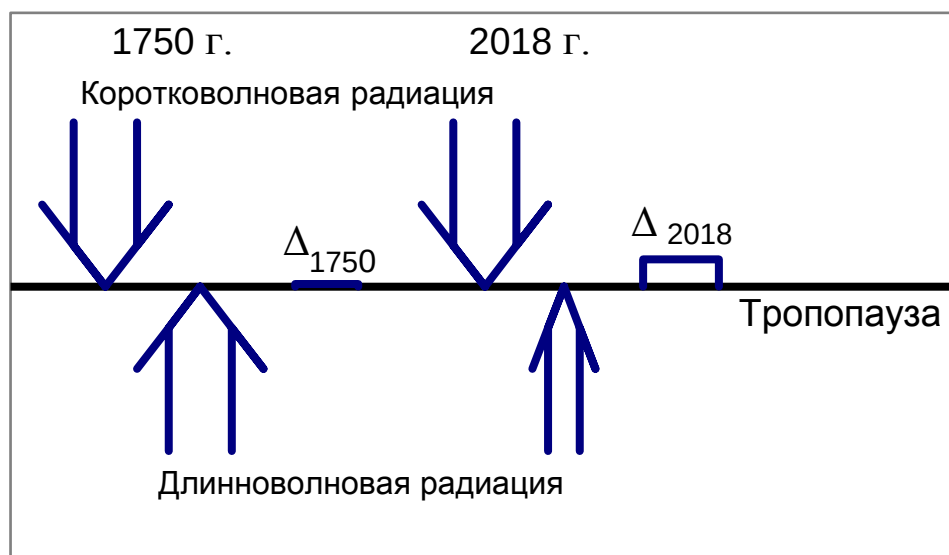


Рис. 7. Иллюстрация к понятию «радиационный форсинг».
 Каждая стрелка над чертой соответствует $I^\downarrow(h) - I^\uparrow(h)$, а под чертой $S^\uparrow(h) - S^\downarrow(h)$.
 Каждая из Δ_{1750} и Δ_{2018} представляет собой разность между коротковолновой и длинноволновой радиацией на уровне тропопаузы в указанные годы ($\Delta_{1750} \approx 0$; $\Delta_{2018} > 0$). Тогда в 2018 году радиационный форсинг $RF = \Delta_{2018} - \Delta_{1750}$.

Первоначально вычисление радиационного форсинга осуществлялось с помощью параметризационных формул [6], в частности для CO_2 и CH_4 :

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

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

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

где C — концентрация CO_2 в млн⁻¹, M и N — концентрации CH_4 и N_2O в млрд⁻¹. Индекс «0» соответствует «невозмущённому» состоянию (моменту времени t_1), а концентрации без индекса — моменту времени t_2 . Очевидно, изменение величины RF в этом случае полностью зависит от того, как эволюционируют концентрации трёх вышеперечисленных газов (такой форсинг принято называть *прямым*). На рисунке 8 показаны значения прямых радиационных форсингов CO_2 и CH_4 в последние десятилетия, рассчитанные по этим параметризационным формулам.

Как видно из рис. 8, чуть менее чем за 40 лет рост концентраций трёх парниковых газов обусловил удвоение радиационного форсинга углекислого газа и примерно 25%-е увеличение RF CH_4 .

В последующем, с развитием сложных климатических моделей, включающих в себя как радиационные, так и химические блоки, расчёты радиационного форсинга производятся непосредственно, следуя вышеприведённому определению. Однако поскольку каждая такая модель имеет свои особенности (и свои недостатки), то при анализе полученных с их помощью результатов указывают как «наилучшее» значение, так и разброс значений по всему ансамблю использованных моделей. Модельные современные величины прямых RF CO_2 и CH_4 , обусловленных ростом содержания этих газов в атмосфере, согласно [5], оцениваются как $1,66 \pm 0,17$ и $0,48 \pm 0,05$ Вт/м² соответственно (в данном случае рассматривается эффект от увеличения атмосферных концентраций углекислого газа и метана в период 1750—2011 гг.). Сопоставив эти значения с представленными на рис. 8, мы обнаружим, что параметризационные формулы несколько завышают оценки прямых RF — как для углекислого газа, так и для метана.

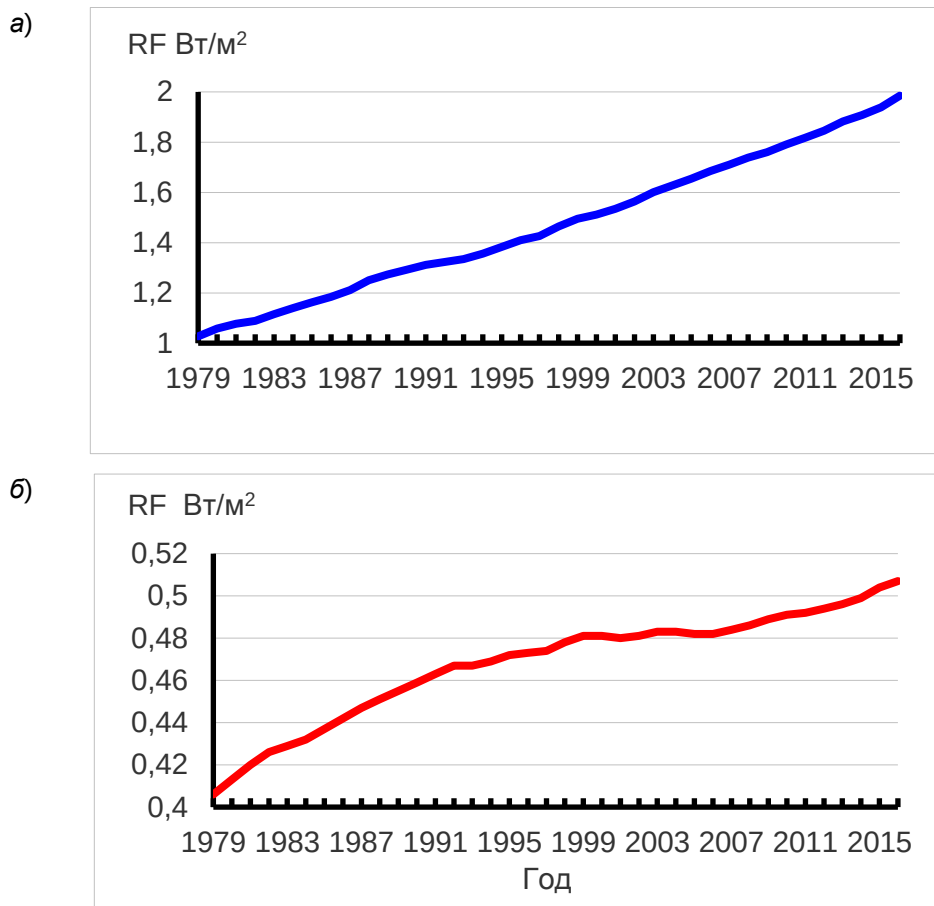


Рис. 8. Изменения со временем величины $RF\ CO_2$ (сверху) и CH_4 (снизу), рассчитанные по параметризационным формулам, согласно [11]. В формуле для вычисления $RF\ CO_2$ вместо коэффициента 6,3 использовано уточнённое значение 5,35. Начальному моменту времени соответствуют «доиндустриальные» значения $C_o = 278\ \text{млн}^{-1}$, $M_o = 722\ \text{млрд}^{-1}$ и $N_o = 270\ \text{млрд}^{-1}$.

Огромное преимущество модельных расчётов перед использованием параметризационных формул заключается в способности моделей учитывать целый комплекс процессов, усиливающих или ослабляющих эффект возрастания содержания парниковых газов в атмосфере. Это очень важный фактор! Если в случае с CO_2 прямой радиационный форсинг в целом объективно отражает складывающуюся ситуацию, так как углекислый газ фотохимически пассивен в атмосфере, то метан участвует в протекающих в атмосфере фотохимических процессах и тем самым влияет на содержание других компонент атмосферного воздуха, в том числе парниковых газов. Наиболее существенно такое влияние на озон и водяной пар (см. раздел 5), в меньшей степени — на углекислый газ. Поэтому в ходе оценки лепты, вносимой метаном в глобальное потепление, помимо прямого радиационного форсинга вычисляют *непрямой* радиационный форсинг, обусловленный фотохимической

активностью метана. Тогда итоговая величина радиационного форсинга, представляющая собой сумму прямого и непрямого форсингов, достигает $0,97 \pm 0,23 \text{ Вт/м}^2$ (см. рис. 9, а также [12]). Происходит удвоение радиационного форсинга метана!

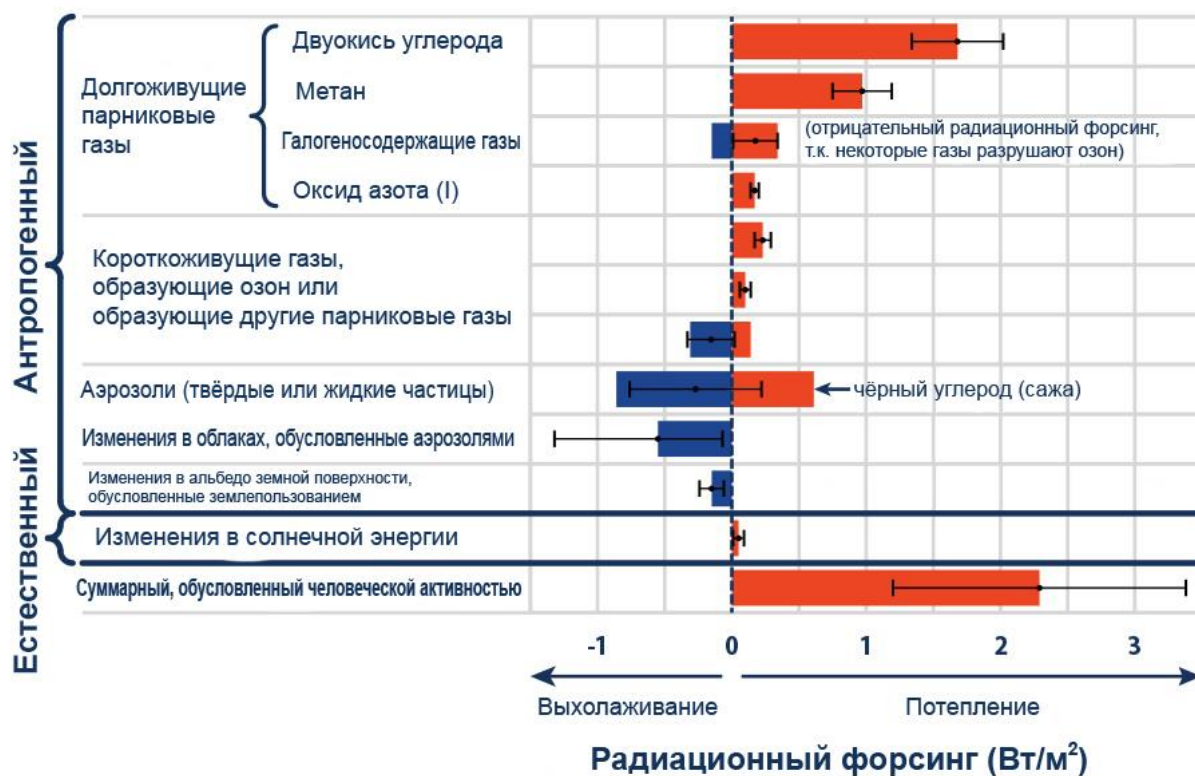


Рис. 9. Радиационный форсинг, обусловленный антропогенной деятельностью, начиная с 1750 г. [5].

Нельзя считать вопрос оценки радиационного форсинга метана (и других парниковых газов) окончательно решённым. До сих пор появляются публикации, направленные на уточнение методов его расчёта. Например, недавно появилась статья за авторством одного из инициаторов введения этого критерия К. Шайна, в которой указывается на необходимость более аккуратного учёта поглощения коротковолновой радиации молекулами углекислого газа, метана и закиси азота (более привычное название оксида азота (I)), в том числе эффектов взаимного перекрытия полос поглощения этими газами [13]: такой учёт приведёт к росту величины радиационного форсинга метана ещё примерно на $0,13 \text{ Вт/м}^2$.

Несомненно, использование радиационного форсинга позволяет сравнить вклады различных парниковых газов в современное глобальное потепление, но является ли такое сравнение исчерпывающим? Очевидно, нет. Ведь оно даёт лишь совокупный итог, полученный в результате воздействия на атмосферу всех

присутствующих в ней молекул CO_2 (или CH_4 , или любого другого парникового газа). Но количество молекул разных парниковых газов в атмосфере может различаться в сотни и даже многие тысячи раз. Например, в марте 2018 г., согласно измерениям [14], средние по земному шару концентрации CO_2 и CH_4 составляли 408,75 и 1,8591 млн⁻¹. То есть первая превосходила вторую в 220 раз, в то время как форсинги CO_2 и CH_4 , как ни считай, оказываются вполне соизмеримыми. Такое возможно только, если каждая молекула метана будет «работать» на глобальное потепление гораздо эффективнее, чем молекула углекислого газа. Насколько эффективнее? Ответить на этот вопрос призван другой критерий — Потенциал Глобального Потепления (ПГП), позволяющий сопоставить индивидуальный вклад каждого парникового газа с эталонным***.

Согласно табл. 1, например, один килограмм метана разогревает атмосферу эффективнее одного килограмма углекислого газа в 67, 23 и 6,9 раз при расчётах на 20-, 100- и 500-летний периоды. Разница в значениях достигается вследствие того, что действие молекулы метана прекращается примерно через 10 лет (см. графу «Время жизни»), тогда как молекула CO_2 находится в атмосфере около 100 лет и всё это время продолжает «работать» на потепление.

Отметим, что приведённые в табл. 1 значения ПГП не являются «истиной в последней инстанции», так как, по разным оценкам, существует их небольшой разброс. А при учёте фотохимической активности метана (его воздействия на содержание озона и водяного пара в атмосфере) величина ПГП CH_4 возрастает до 86 для 20-летнего и 34 для 100-летнего периодов [16].

Итак, несмотря на относительную неэффективность молекул CO_2 , углекислый газ является вторым после водяного пара и самым сильным антропогенным парниковым газом, а метан в этой иерархии следует за ним (см. рис. 9). Однако нельзя не обратить внимание на то обстоятельство, что с доиндустриальных времён по сей день концентрация CH_4 росла значительно быстрее, чем концентрация CO_2 (на 157 и 47 % соответственно). Это значит, что

*** Для лиц, не страдающих «интегралофобией», приведём строгое определение ПГП:

$$\text{ПГП}_A^X = \int_0^T RF_X(t)dt / \int_0^T RF_A(t)dt$$

Здесь RF — меняющаяся со временем величина радиационного форсинга, обусловленного выбросом в момент $t = 0$ одинаковых масс (условно 1 кг) либо исследуемого (X), либо эталонного (A) газа. Рассматривается три варианта величины $T = 20$ -, 100- и 500 лет для коротко-, средне- и долгопериодных изменений климата [6]. В качестве эталонного газа используют CO_2 , ПГП которого, очевидно, равен единице.

при сохранении такой тенденции в обозримом будущем, вклад метана в глобальное потепление будет только увеличиваться. Но это также означает, что меры по ограничению эмиссии метана в атмосферу должны оказаться куда более действенными, нежели подобные меры для углекислого газа.

Таблица 1

Потенциалы Глобального Потепления некоторых газов, присутствующих в воздухе [15]

Газ	Химическая формула	«Время жизни» (количество лет)	Потенциал глобального потепления для периода		
			20 лет	100 лет	500 лет
Метан	CH ₄	~10	67	23	6,9
Заись азота	N ₂ O	114	291	298	153
Фреон-11	CFCl ₃	45	6700	4750	1620
Фреон-12	CF ₂ Cl ₂	100	11000	10800	5200
Фреон-113	CCl ₂ FCFCl ₂	85	6540	6130	2700
Фреон-114	CClF ₂ CCFCl ₂	300	8040	10000	8700
Фреон-115	CCFCl ₂ CF ₃	1700	5310	7370	10000
Фреон-22	CHClF ₂	12	5200	1800	550
Галон-1301	CBrF ₃	65	8480	7140	2760
Галлон-1211	CBrClF ₂	16	4750	1890	575
Гексафторид серы	SF ₆	3200	16300	22800	32600
Фреон-14	CF ₄	50000	5210	7390	11200

Нелишне упомянуть ещё об одном, утилитарном, использовании ПГП. Список атмосферных парниковых газов довольно велик, они имеют сильно отличающиеся концентрации, размеры эмиссии и разные оптические свойства, поэтому рассматривать каждый из них по отдельности далеко не всегда удобно. Желательно (особенно для неспециалистов) как-то объединить их, «аршином общим измерить». Но как? Получается ситуация сродни школьной задаче: «сколько будет, если сложить X тонн кирпичей и Y тонн яблок?» Скажете, такое сложение бессмысленно? Конечно. А теперь представьте себе, что вопрос возник в связи с потребностью перевозки кирпичей и яблок «из пункта А в пункт Б». Тогда он неожиданно приобретает конкретный смысл: какую грузоподъёмность или какую вместимость транспорта нужно обеспечить. Благодаря найденному критерию, наше сложение обрело целесообразность.

Аналогичный подход можно осуществить в отношении парниковых газов, поскольку каждый из них вносит посильный вклад в разогрев атмосферного воздуха. Для того, чтобы «привести к общему знаменателю» все парниковые газы, широко используется «CO₂-эквивалент». В соответствии с приведённым в [15] определением, «эквивалентный выброс CO₂ (CO₂-эквивалент) — это объём выброса CO₂, который вызвал бы такое же комплексное радиационное воздействие за данный период времени, как и объём выброса любого долгоживущего парникового газа или смеси парниковых газов». Поэтому логично, что эквивалентный выброс CO₂ рассчитывают путём умножения объёма выброса какого-либо парникового газа на его Потенциал Глобального Потепления за данный период времени. Обычно на практике выбирают значение 100-летнего ПГП, тогда, например, при пересчёте выбросов метана в атмосферу одна тонна выброса CH₄ соответствует выбросу 23 тонн CO₂ (см. табл. 1). В CO₂-эквиваленте сегодня производятся расчёты общемировой антропогенной нагрузки на атмосферу, а также национальные ежегодные кадастровые оценки эмиссии парниковых газов^{****}.

Мы его теряем...

Для того чтобы понять, что происходит с молекулами метана в атмосфере, вполне достаточно азов, полученных на школьных уроках химии. Ежесекундно в атмосфере происходят десятки тысяч химических реакций с участием сотен и тысяч компонентов воздуха, в их результате гибнут одни и образуются другие химические соединения. Некоторые из них впоследствии вновь возникают в воздухе, возрождаясь, словно птица Феникс из пепла, иные удаляются из атмосферы безвозвратно. К таким последним относится метан. Мы уже упоминали, что химическим путем в атмосфере он не образуется. Метан нельзя отнести к химически активным газам, но в нескольких реакциях он всё же участвует, они-то и обеспечивают его «эмиграцию» из атмосферы.

Основным метаноразрушающим механизмом по праву считается его реакция с гидроксильным радикалом:



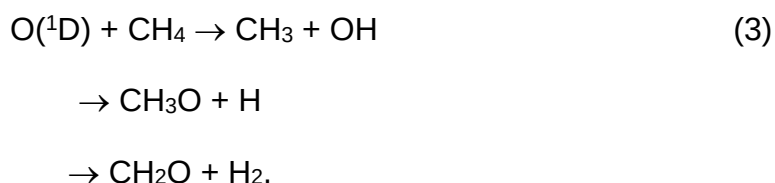
^{****} См., например, российский кадастр за 2017 г. [17]. В соответствии с существующими международными рекомендациями, в расчётах 100-летний ПГП CH₄ принимают равным 25.

В тропосфере на эту реакцию приходится потеря около 90 % молекул метана. В верхней стратосфере (выше 35 км) с ней успешно конкурирует реакция метана с атомарным хлором:



Эта реакция протекает и в тропосфере, однако она вносит некоторый вклад в химический сток CH_4 главным образом над океанической поверхностью.

Доля ещё одной метаноразрушающей реакции CH_4 с атомом кислорода в возбуждённом состоянии ^1D в фотохимическом стоке метана относительно невелика:



На выходе этой реакции могут образовываться разные компоненты, с наибольшей вероятностью (75 %) протекает реакция по первому из указанных выходов, а на второй и третий приходятся 20 и 5 % соответственно [18].

Наконец, упомянем о разрушении молекул CH_4 солнечными лучами в верхней стратосфере:



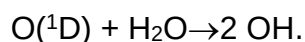
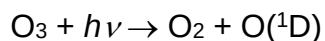
в так называемой фотолитической реакции (фотолиз — поглощение фотона солнечной радиации $h\nu$ с достаточной энергией, чтобы разрушить молекулу). Фотолиз CH_4 происходит настолько вяло, что в расчётах им часто пренебрегают*.

На этом список метаноразрушающих атмосферных процессов можно считать исчерпанным. Однако, ввиду того, что наш интерес к метану продиктован его влиянием на современный климат, вышеупомянутый список нуждается в некоторых пояснениях и обсуждении.

Для того чтобы реакции (1)—(3) осуществились, необходимо наличие в атмосфере гидроксильного радикала OH , возбуждённых атомов кислорода $\text{O}(^1\text{D})$, а также атомов хлора. Все они химически активны, особенно радикалы OH , готовые реагировать с огромным числом составляющих атмосферного

* Скорости реакций (1)—(3) и параметры, необходимые для вычисления скорости фотолиза (4), можно найти в регулярно издаваемом справочнике, содержащем все основные атмосферные химические реакции [18].

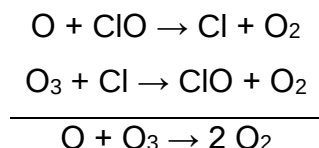
воздуха (неслучайно в специальной литературе гидроксил называют «ключевой атмосферный очиститель» (key atmospheric cleaner)). Образование гидроксильных радикалов (а также атомов $O(^1D)$) происходит только в светлое время суток. Основной механизм, ответственный за появление радикалов OH, описывается двумя реакциями:



В первой из них озон фотолитически разрушается (фотонами с длиной волны 310 нм и короче), доставляя при этом возбуждённые атомы кислорода, в свою очередь реагирующие с молекулами водяного пара и на выходе обеспечивающие возникновение двух радикалов OH. Существует одновременно и ряд других путей образования гидроксильного радикала, эффективность которых во многом зависит от того, насколько атмосфера загрязнена азотными окислами (в первую очередь, NO) [19], но они носят вторичный характер. Степень химической агрессивности OH прекрасно иллюстрирует такой факт: с момента образования радикала до момента его гибели проходит всего лишь несколько секунд.

Разрушение молекул метана в реакциях (1) и (3) имеет последствия. Продукты этих реакций включаются в цикл химических преобразований, в результате которого происходит образование двуокиси углерода CO_2 и водяного пара H_2O — двух основных парниковых газов (см. рис. 10).

На содержании ещё одного парникового газа, озона, сказывается существование в атмосфере реакции (2), связывающей озonoактивные атомы хлора. Хорошо известно, что хлорный каталитический цикл разрушения озона (под чертой приведена «сумма» двух реакций)



является одним из наиболее эффективных: каждый атом хлора за время своего пребывания в атмосфере может поспособствовать уничтожению до 100 тысяч молекул озона. Наблюдавшийся во второй половине прошлого века интенсивный рост содержания хлорных составляющих во многом определялся эмиссией рукотворных фреонов, разрушение которых в стратосфере служило

бесперебойным источником атомов хлора. Последующее снижение концентрации Cl обусловлено мерами по ограничению производства и использования фреонов в рамках Монреальского протокола 1987 г. С другой стороны, выведение из атмосферы уже попавших туда атомов хлора до некоторой степени можно считать «заслугой» метана. Таким образом, благодаря реакции (2) снижается эффективность вышеприведённого каталитического цикла, благоприятствуя восстановлению озонового слоя, но в то же время изменяется степень воздействия озона на парниковый эффект.

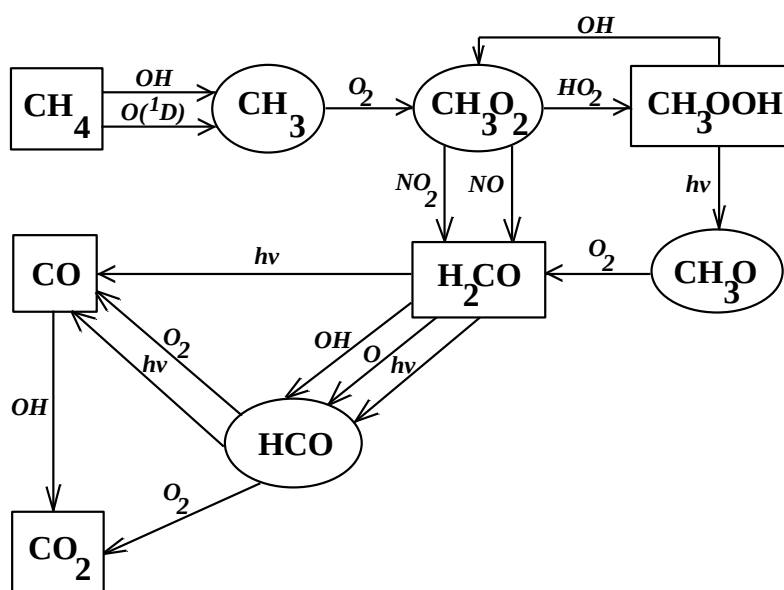


Рис. 10. Схема окисления метана в атмосфере.

Радикалы в овалах имеют время жизни в атмосфере порядка нескольких минут, а компоненты в прямоугольниках — дни или более. Над стрелками показаны воздушные компоненты, с которыми реагируют соединения, указанные в прямоугольниках и овалах.

Вклады отдельных процессов в тропосферный сток CH_4 численно оцениваются с помощью современных моделей; они складываются из химического стока (реакция с OH — 440 ± 52 Тг CH_4 в год [20], реакция с Cl — 25 Тг CH_4 в год [21]), поглощения метана почвенными бактериями (30—40 Тг CH_4 в год [22, 23]), а также его переноса в стратосферу, что даёт в сумме 540 ± 56 Тг CH_4 в год [20]**. Стратосферные потери, обусловленные реакциями CH_4 с OH, Cl и $\text{O}(^1\text{D})$, оцениваются примерно в 50 Тг CH_4 в год [24]. Величина погрешности в этих вкладах является весьма критичной, поскольку

** Приведённые здесь оценки не являются «истиной в последней инстанции»: в других публикациях можно найти несколько иные их значения. Однако, как правило, такие расхождения лежат в рамках указанных погрешностей.

методики оценок как стока, так и источников CH_4 не могут быть построены на прямых данных измерений, но лишь с привлечением математических методов из предположения примерного паритета между источниками и стоками. Значит, при большей погрешности в оценке стока CH_4 менее точно будет оценена интенсивность его суммарного источника. Это обстоятельство делает очень актуальными усилия по сокращению погрешностей, присущих экспертным оценкам.

Очевидно, что время пребывания метана в атмосфере (которое обычно называют «временем жизни») прямо зависит от интенсивности его стока: чем большее число молекул CH_4 уничтожается в реакциях (1)—(3) в единицу времени, тем быстрее его «запас» иссякнет. Сегодня считается, что «время жизни» метана в атмосфере составляет 9—10 лет (например, $9,1 \pm 0,9$ лет [20] и $9,8 \pm 1,6$ лет [25]).

Теперь самое время рассказать о том, откуда возникает этот «запас» и как он пополняется.

... и обретаем

Если описанием процессов удаления метана из тропосферы мы обязаны химикам, то, когда речь заходит об обсуждении его источников, настает черед математиков. И вот почему.

Все источники метана обычно делят на две большие группы: естественные и антропогенные. К первым относят потоки CH_4 с поверхности заболоченных территорий, пресноводных водоёмов, океанической поверхности, а также метан, образующийся в колониях термитов и выделяемый при сжигании огромных объёмов биомассы в результате пожаров. В число антропогенных источников входят потоки, попадающие в атмосферу при добыче ископаемого топлива, с мусорных свалок и при последующем сжигании бытовых отходов, очистке сточных вод, расширении сельскохозяйственных угодий (в том числе рисовых плантаций), при разведении крупного рогатого скота. Нелишне заметить, что деление источников на антропогенные и естественные несколько условно — осушаются естественные болота, метан присутствует в продуктах жизнедеятельности не только домашних, но и диких травоядных животных.

Определение суммарного количества метана, поступающего в атмосферу от каждого из источников, — несомненно, важная, но вряд ли решаемая инструментальными средствами задача. Поток CH_4 , например,

с поверхности заболоченных территорий существенно зависит от температуры поверхности, типа болота (торфяного, сфагнового и др.), характера растительности и её плотности, наличия или отсутствия воды на поверхности и других факторов. Поскольку заболоченные территории встречаются повсеместно (исключая полярные области), и каждой местности присущи свой климатический режим и своя растительность, величины потока CH_4 с разных увлажнённых территорий будут заметно отличаться, а организация регулярных измерений потока CH_4 в столь большом количестве мест практически неосуществима. Да и представить каждую корову (лошадь, козу и пр.) с индивидуальным датчиком, замеры которого регулярно бы собирались и аккуратно архивировались, тоже весьма проблематично. Поэтому мощность каждого источника метана приходится определять с помощью математических методов.

Сегодня для этого используются два подхода. Первый подход* основан на анализе результатов прямых натурных измерений концентрации CH_4 и решении «обратной задачи», то есть отыскании величины выброса метана в атмосферу — такой, чтобы она, будучи подставленной в модель, обеспечивала наилучшее согласие расчётных концентраций CH_4 с измеренными. Далее в рамках этого подхода производят обобщение модельных результатов на больший (вплоть до глобального) пространственный масштаб. Такое обобщение, с одной стороны, позволяет получить оценку эмиссии метана, но, с другой, является источником систематических ошибок, поскольку сеть пунктов измерений недостаточно равномерно покрывает земную поверхность и недостаточно густа. Как следствие, при отсутствии необходимых данных в регионе ему приписываются «правдоподобные» оценки из соседнего региона, а при этом учёт пространственно-временной изменчивости оказывается неадекватным реалиям.

Чтобы нейтрализовать этот недостаток, существует второй подход**, при котором используются расчёты с помощью моделей, учитывающих многие сотни химических процессов и перенос воздушных масс в атмосфере. При этом необходимые метеорологические поля задаются с высоким пространственным и временным разрешением, обычно с привлечением данных реанализа***.

* В англоязычной литературе этот подход называют "bottom-up approach".

** В англоязычной литературе его называют "top-down approach".

*** Реанализы представляют собой результаты модельных расчетов атмосферных полей, произведённые с учётом всего комплекса имеющихся данных наблюдений таких ключевых

Расчёты нацелены на оптимизацию их наилучшего согласия с доступными данными наблюдений. В этом случае *каждый* регион обретает свои, «индивидуальные» поля концентраций метана и прочих атмосферных компонент, а также оценки его эмиссии. Главное преимущество такого подхода заключается в том, что обеспечивается выполнение фундаментальных законов сохранения (в том числе закона сохранения массы метана). Однако и он не лишён недостатков, поскольку использует метеорологические данные, которым присущи немалые погрешности, да и каждая модель имеет свои особенности и дефекты.

Таким образом, когда производятся оценки потоков метана в атмосферу в относительно небольшом регионе, где налажен качественный мониторинг (имеется достаточно густая сеть станций), более предпочтителен первый подход. Однако при проведении экспертных оценок на больших территориях, континентального и тем более глобального масштаба, оценки, полученные при втором подходе, более надёжны.

За последние годы появились две работы, посвящённые оценкам глобальной эмиссии метана и его разрушения в атмосфере. В одной из них, [24], экспертные оценки охватывают период 2000—2009 гг., в другой, [26], — десятилетие 2003—2012 гг.; в табл. 2 они обобщены, следуя [16].

Нетрудно заметить значительную разницу в оценках для двух вышеупомянутых подходов: превосходство эмиссии CH_4 и его стока, полученных в рамках первого подхода, по сравнению со вторым составляет 31,7 %, и 14,9 % соответственно. Однако куда более важно отсутствие баланса между суммарными источниками и стоками метана при первом подходе — 736 и 632 Мт CH_4 в год, т. е. расхождение равно 16,5 %, в то время как при втором подходе аналогичный разбаланс на порядок меньше — 1,6 %. Это обстоятельство подтверждает тезис о большей надёжности второго подхода при проведении глобальных оценок.

Небезынтересно сопоставить также современные представления экспертов об относительных долях естественных и антропогенных источников метана с аналогичными оценками 25-летней давности из [27] (см. рис. 11).

характеристик, как температура, влажность, атмосферное давление и др. Там, где такие данные отсутствуют, они дополняются соответствующими модельными результатами. После этого весь комплекс значений каждой из характеристик подвергается процедуре ассимиляции — созданию такого результирующего гладкого взаимосогласованного поля в заданных точках поверхности земного шара и атмосферы (в узлах модельной сетки), которое максимально приближено к значениям исходного комплекса.

Таблица 2

Ежегодный глобальный бюджет CH_4 (Мт/год)
([16], по оценкам из [24, 26], в скобках разброс оценок)

	Первый подход	Второй подход
Естественные источники	384 (257–524)	231 (194–296)
Естественные переувлажнённые территории	185 (153–227)	167 (127–202)
Другие естественные источники	199 (104–297)	64 (21–132)
Другие наземные источники	185 (99–272)	
Пресные воды	122 (60–180)	
Геологические (береговые)	40 (30–56)	
Дикие животные	10 (5–15)	
Термиты	9 (3–15)	
Лесные пожары	3 (1–5)	
Вечная мерзлота	1 (0–1)	
Океанические источники	14 (5–25)	
Геологические (прибрежные)	12 (5–20)	
Другие (включая метаногидраты)	2 (0–5)	
Антропогенные источники	352 (340–360)	328 (259–370)
С/х и мусор	195 (178–206)	188 (115–243)
Ферментация в кишечниках и навоз	106 (97–111)	
Землепользование и мусор	59 (52–63)	
Культивирование риса	30 (24–36)	
Ископаемое топливо	121 (114–133)	105 (77–133)
Угольные шахты	41 (26–50)	
Газ, нефть и промышленность	79 (69–88)	
Сжигание биомассы и биотоплива	30 (27–35)	34 (15–53)
Стоки (согласно [24])		
Химические стоки	604 (483–738)	518 (510–538)
Тропосферный ОН	528 (454–617)	
Стратосферные стоки	51 (16–84)	
Тропосферный СI	25 (13–37)	
Поглощение почвой	28 (9–47)	32 (26–42)
Сумма всех источников	736 (567–884)	559 (453–666)
Сумма всех стоков	632 (492–785)	550 (536–580)

Наблюдается тенденция к постепенному «выравниванию» их вкладов: если к 1994 г. суммарные антропогенная и естественная эмиссии CH_4 соотносились как $\sim 2 : 1$, то ныне их пропорция $\sim 3 : 2$ (при втором, «более реалистичном», подходе). Едва ли сим фактом мы обязаны исключительно эффективности международных мер последних десятилетий по сокращению выбросов парниковых газов в атмосферу. В не меньшей, а скорее в большей степени это связано с комплексом усилий, направленных на повышение качества инвентаризации содержания метана и его эмиссии в атмосферу (налаживание регулярного мониторинга, в том числе спутникового, разработка новых методик учёта выбросов и пр.). Парадоксально, но о естественных источниках метана сведений значительно меньше, чем об антропогенных. Если для оценки его антропогенной эмиссии разработаны и внедрены общепринятые методики, то для инвентаризации естественных выбросов CH_4 такой процедуры нет. Это неудивительно: долгие годы первоочередной интерес представляли как раз антропогенные источники, так как контролировать их и управлять ими всё же заметно проще, чем их естественными «собратями», а именно такая задача ставилась Киотским протоколом.

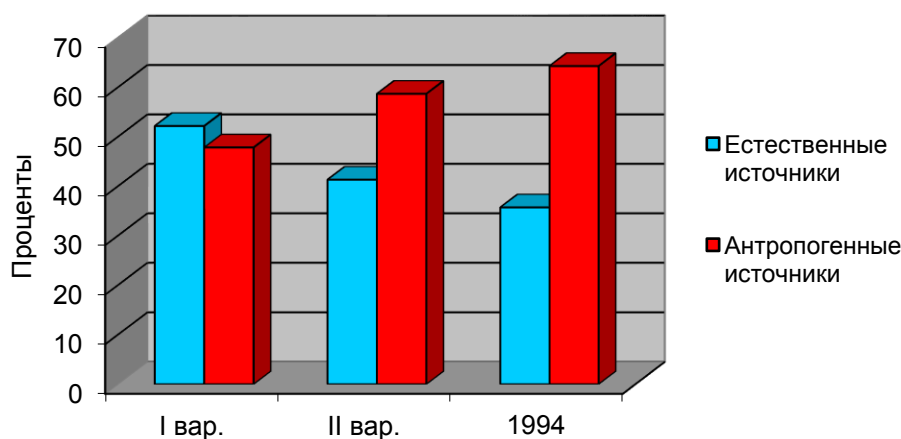


Рис. 11. Соотношение между величинами естественных и антропогенных источников метана (%) для I и II подходов (см. выше) и для оценок 1994 г., согласно [27].

Хорошей иллюстрацией к сказанному является более чем двукратное сокращение погрешностей в экспертных оценках суммарных глобальных источников CH_4 за прошедшие 25 лет (см. рис. 12). По оценкам [27], их разброс составлял около 95 %, а, согласно [16], 43 и 38 % для первого и второго подходов соответственно.

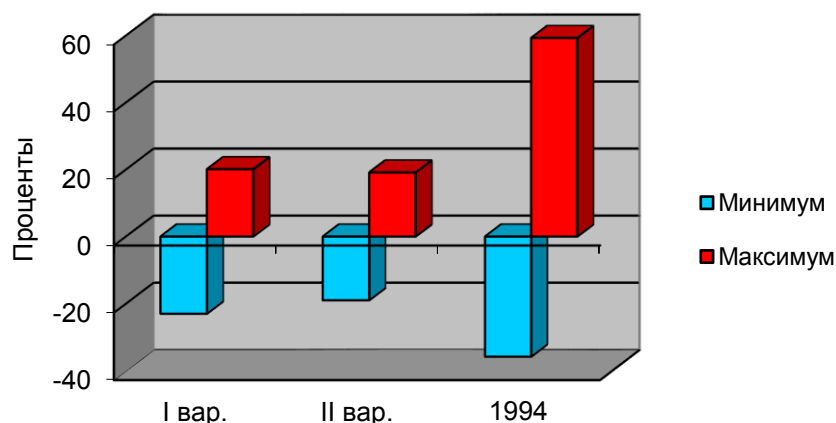


Рис. 12. Минимальное и максимальное отклонения относительно средних значений в экспертных оценках суммарных глобальных источников метана (%) для I и II подходов (см. выше) и для оценок 1994 г., согласно [27].

Если же выделить основные категории глобальных выбросов метана, то согласно [16] (по оценкам в рамках второго подхода), сложится следующая картина (см. рис. 13): почти 2/3 эмиссии в примерно равных долях приходится на сельскохозяйственную деятельность и потоки с различных переувлажнённых территорий и ещё около 1/5 даёт добыча и сжигание природного топлива. Дополняют картину вклады от других естественных источников и сжигание биомассы (в том числе биотоплива).

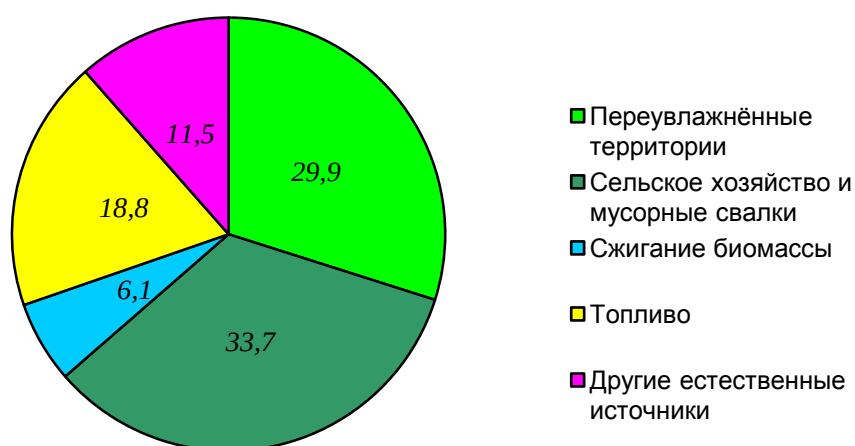


Рис. 13. Доли (%) современных основных категорий глобальных источников метана в соответствии со вторым подходом [16].

Приведённые выше оценки дают представление о ежегодной суммарной эмиссии CH_4 в атмосферу в глобальном масштабе. Однако не менее важно определить географическое расположение его главных источников по земной поверхности и их интенсивность.

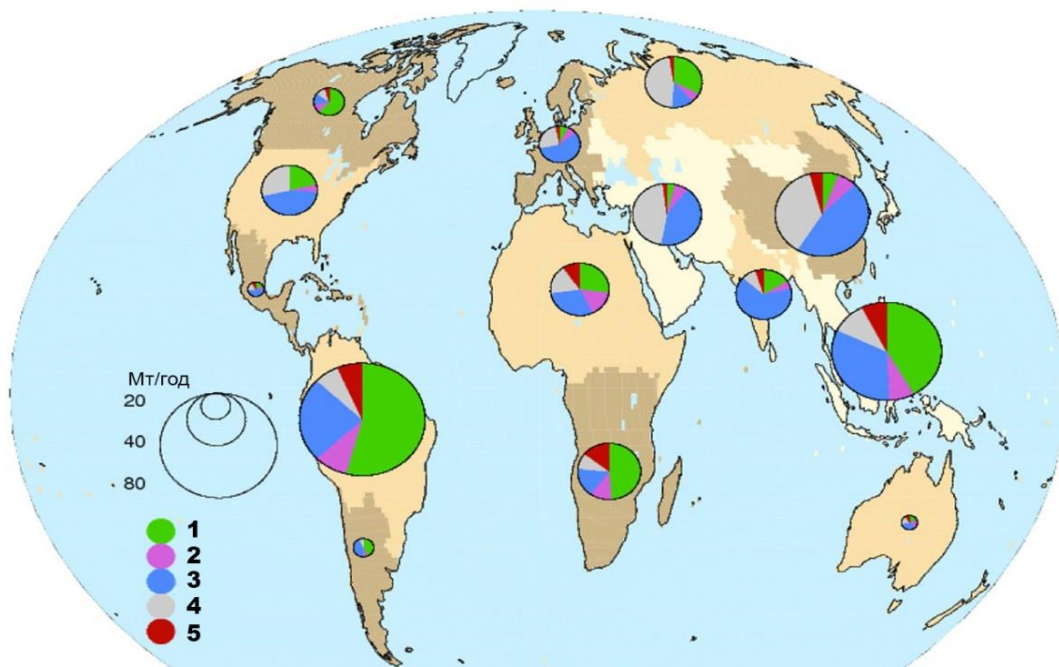


Рис. 14. Среднегодовые эмиссии метана в период 2003—2012 гг. для 14 континентальных регионов и 5 категорий выбросов (Мт CH_4 /год) [28].
 Переувлажнённые территории — 1, Другие естественные источники — 2, Сельское хозяйство и мусорные свалки — 3, Топливо — 4, Сжигание биомассы — 5.
 Средние по ансамблю оценки с использованием второго подхода.

Результаты такой недавно проведённой инвентаризации основных источников метана можно видеть на рис. 14. Исходя из него, главной метаноносной областью являются тропики, на которые приходится около 2/3 глобальной эмиссии CH_4 .

Таблица 3

Оценки выбросов метана (Мт/год) в 2012 г. в различных широтных поясах, полученные с помощью второго подхода [26]. В скобках указан разброс значений

Широтный пояс	Эмиссия CH_4	Доля (%)
30° ю. ш. — 30° с. ш.	360 (341—393)	63,4
30—60° с. ш.	185 (164—203)	32,6
60—90° с. ш.	23 (19—31)	4,0

Наибольший вклад здесь вносят страны Южной Америки (16,5 % глобальных выбросов) и Юго-Восточной Азии (13,0 %), причём доля естественных источников превышает долю антропогенных. Далее, по убыванию, следуют Китай (10,2 %), Юго-Западная Азия (8,5 %), Северная Африка (7,2 %), США (7,2 %), Россия (6,9 %) и Индия (6,7 %); отметим, что в каждом из указанных регионов антропогенная эмиссия превышает естественную. При этом почти во всех этих странах около половины эмиссии метана (а в Индии существенно больше) обусловлено сельскохозяйственной деятельностью. Лишь в газо- и нефтедобывающих России и Юго-Западной Азии (и в меньшей степени в угледобывающем Китае) извлечение и сжигание топлива также оценивается в половину всех их метанных источников. Очевидна неравномерность расположения источников — почти все «весомые» источники находятся в северном полушарии; относительно немногие имеющиеся в южном полушарии сосредоточены в тропическом поясе и практически отсутствуют южнее него. Такое распределение совершенно естественно — ведь площадь суши в северном полушарии примерно вдвое больше, чем в южном. К тому же, согласно Википедии, в северном полушарии проживает примерно 90 % населения Земли, а, значит, именно там практически полностью сосредоточены антропогенные источники.

Теперь поговорим подробнее о вкладе нашей страны в выбросы метана в атмосферу. По приведённым выше оценкам [28], доля потока CH_4 с российских переувлажнённых территорий составляет примерно треть и ещё около половины потока приходится на добычу и использование ископаемого топлива (см. рис. 14). А как это видится «изнутри», т. е. по данным российских специалистов?

Начнём с оценок антропогенных российских выбросов метана. Результаты контроля за состоянием окружающей среды и её загрязнением с территории Российской Федерации регулярно обнародуются в течение последних лет. Усилиями ряда институтов Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды подготавливаются и публикуются, начиная с 2005 г., ежегодные обзоры (см., например, последний из них [29]). До недавнего времени, в соответствии с обязательствами нашей страны в рамках Киотского протокола, периодически обнародовались официальные Сообщения с подробным описанием и анализом антропогенной эмиссии парниковых газов с российской территории [30].

В таблице 4 представлены данные об антропогенных выбросах метана в атмосферу из российских источников в последние десятилетия [29, 30], они рассчитаны, согласно стандартным методикам Межправительственной Группы Экспертов по Изменениям Климата (МГЭИК). «Энергетическая» доля составляет около 76—81 % в общей антропогенной эмиссии российского метана, «сельскохозяйственный» вклад оценивается в 6—10 %, «обработка отходов» привносит ещё 10—13 %, а за 1—2 % «ответственны» лесные пожары, возникшие как по антропогенным, так и по естественным причинам.

Таблица 4

**Выбросы метана в различных секторах хозяйства России
в указанные годы (в Мт/год) по данным [30]**

Категории источников	Год					
	1990	2000	2005	2010	2013	2015
Энергетика						
Сжигание топлива	0,55	0,14	0,16	0,15	0,13	0,14
Технологические выбросы и утечки	28,65	19,54	25,76	26,96	27,70	27,74
Промышленность						
Химическая промышленность	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Металлургия	0,004	0,004	0,005	0,005	0,005	0,005
Сельское хозяйство						
Внутренняя ферментация сельскохозяйственных животных	5,04	2,32	2,08	1,96	1,98	1,99
Системы сбора, хранения и использования навоза и помёта	0,43	0,18	0,15	0,16	0,17	0,17
Выращивание риса	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Лесные пожары	0,48	0,48	0,58	0,61	0,55	0,61
Отходы производства и потребления						
Захоронение твёрдых отходов в земле	1,89	2,18	2,39	2,79	3,12	3,37
Очистка и сброс сточных вод	1,07	0,90	0,95	0,95	1,00	1,10
Биологическая обработка твёрдых отходов	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Сумма	38,16	25,79	32,11	33,61	34,70	35,17

В «энергетическом» секторе на непосредственное сжигание топлива приходится лишь 0,5—0,7 % (!), остальное — следствие технологических выбросов и утечек. Продукты жизнедеятельности крупного рогатого скота «обеспечивают» львиную долю выбросов метана в «сельскохозяйственном»

секторе. Таким образом, антропогенная эмиссия CH_4 в России, как и ранее, «покоится на трех китах»: энергетике, сельском хозяйстве и обработке промышленных и бытовых отходов.

Об естественных источниках метана сведений значительно меньше. Как уже говорилось выше, на сегодня общих методик для инвентаризации естественных выбросов CH_4 нет. Увы, нам неизвестны недавние публикации, содержащие оценку потока метана с российских переувлажнённых территорий, поэтому приходится ссылаться на работы, в которых деление на регионы проходит не по национальным границам. Так, в [24] представлены оценки эмиссии CH_4 с переувлажнённых территорий «северной Евразии» (полностью российских) — 9 Мт CH_4 /год (с разбросом 4—13 Мт CH_4 /год) и «Евразии умеренных широт» (охватывающей наряду с российскими и часть земель наших южных соседей) — 2 Мт CH_4 /год. По расчетам [31], поток метана из тундры****, как евразийской, так и североамериканской, составлял в 1990-е и 2000-е гг. соответственно 13,7 и 14,7 Мт CH_4 /год (с практически двукратной неопределенностью). Исходя из приведенных выше оценок, можно заключить, что российская естественная эмиссия метана достигает величины порядка 10 Мт CH_4 /год или немного больше****, однако она нуждается в уточнении из-за сохраняющихся значительных погрешностей оценок. Таким образом, если принять это предположение, современный общий выброс метана с территории России составляет около 35—45 Мт CH_4 /год. Такая величина вполне соответствует оценкам из [28] (около 40 Мт CH_4 в год) и [32] (суммарная эмиссия с территории России, Украины, Беларуси и Казахстана — 41,4 Мт C /год (или 55,2 Мт CH_4 /год)).

Говоря о российской эмиссии метана, нельзя не остановиться на его источниках, сегодня не вносящих значительного вклада в суммарную эмиссию, но грозящих оказаться таковыми в перспективе. Речь идёт об источниках российской Арктики. Сегодня Арктика — зона всеобщего повышенного внимания. Во многом это вызвано темпами её потепления: за последние сто лет потепление в арктическом регионе происходило примерно вдвое интенсивнее, чем в среднем по земному шару. Одновременно с увеличением температуры приземного слоя воздуха здесь отмечены изменение количества осадков,

**** Тундра — безлесное, ровное или слегка холмистое пространство, характерное для Арктики и субарктических регионов (Научно-технический энциклопедический словарь).

***** Эта оценка хорошо согласуется с модельными оценками эмиссии CH_4 с территории Западной Сибири 5,3—6,1 Мт/год в период 1993—2004 гг. [33].

влагосодержания почвы и речного стока, уменьшение площади морских льдов; увеличение глубины протаивания в зоне вечной мерзлоты. Столь значительные перемены климатической обстановки открывают заманчивые перспективы развития региона (организация регулярных перевозок по Северному морскому пути, добыча полезных ископаемых и проч.), но и выявляют серьёзные дополнительные риски (напр., ускорение деградации вечной мерзлоты и расположенной на ней инфраструктуры). Очевидно, указанные изменения обусловлены как региональными особенностями (рельефом, альбедо поверхности, системой господствующих здесь ветров и течений, эмиссией в атмосферу парниковых газов и аэрозолей и пр.), так и переносом тепла ветрами и течениями из южных широт к полюсам.

В последние годы широко дискутируется вопрос о возможном вкладе криолитозоны Восточной Сибири в формирование полей концентрации метана в Арктическом регионе. При этом рассматриваются несколько возможных версий эмиссии метана, а именно:

а) выделение газообразного метана из газогидратов, большие залежи которых обнаружены на шельфах моря Лаптевых, Чукотского и др.;

б) выделение метана, захороненного в слое многолетней мерзлоты, при увеличении периода и глубины её протаивания (к которой примыкает и версия, связанная с ролью небольших и относительно неглубоких карстовых озёр, образованных в местах интенсивного таяния многолетней мерзлоты);

в) вклад крупнейших рек Восточной Сибири в перенос растворенного метана в моря Северного Ледовитого океана.

Гидраты метана представляют собой похожую на лёд субстанцию — смесь воды и метана, существующую при температурах не выше 20 °С и давлениях не ниже 3—5 МПа в покрытых водой осадочных породах на глубине 300—500 м. Считается, что 99 % гидратов в глобальном масштабе сконцентрировано на континентальном шельфе. Плотность CH_4 в гидратах более чем в 160 раз превосходит плотность чистого метана при стандартных давлении и температуре. До сих пор существует большая неопределённость в общем объёме газгидратов, а также в том, насколько чувствительны газгидраты, находящиеся в осадочных породах под слоем воды в 300—500 м, к потеплению климата. Несомненно, рост температуры в глубинном океане скажется на увеличении скорости диссоциации метана из газгидратов,

но вследствие большой термической инерции океана процесс этот растянется на сотни лет.

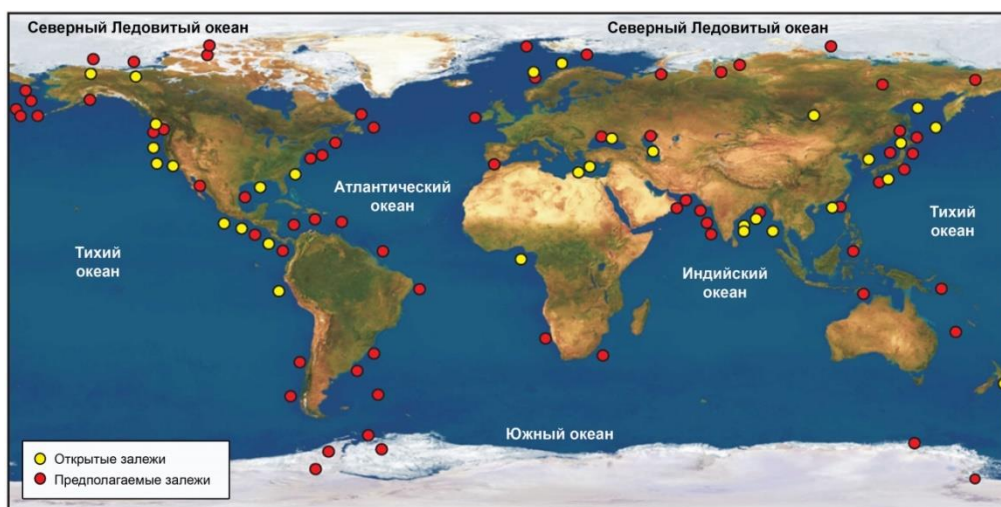


Рис. 15. Распределение залежей метаногидратов в Мировом океане [34].

На рис. 16 показано соотношение потенциальных запасов гидратов CH_4 в морях России (по оценкам геологов [35]). На моря арктические, очевидно, приходится больше половины ресурсов гидратного метана России. Нелишне отметить и такую особенность: арктические моря относительно неглубоки, потому и залежи гидратов в них находятся на меньшей глубине (100—200 м).



Рис. 16. Соотношение потенциальных ресурсов гидратного метана в морях Российской Федерации (в процентах) [35].

По оценке Дж. Диккенса [36], в глобальном масштабе в виде гидратов метана сосредоточено от 7×10^5 до $1,27 \times 10^7$ Мт С (углерода)****. Н. Е. Шахова с коллегами на основе анализа результатов измерений считают, что содержание гидратов только на континентальном шельфе морей Восточной Сибири оценивается в более, чем $3,5 \times 10^5$ Мт С, а ежегодные выбросы CH_4 в атмосферу отсюда достигают 17 Мт [37], что представляется серьёзным завышением (ср. с табл. 2). Модельный расчёт [38] дал более сдержанную оценку: за 100 лет выброс CH_4 из арктических газгидратов составит 473 Мт, т. е. в среднем 4,73 Мт CH_4 /год. Ведутся работы по изучению механизмов и условий высвобождения метана из газгидратов и последующего попадания его в атмосферу, но они далеки от завершения.

Согласно принятой сегодня градации, российская область «вечной» мерзлоты (охватывающая примерно 2/3 всей территории страны, около 10,7 млн км²) делится на три зоны — сплошную, прерывистую и островную (рис. 17).

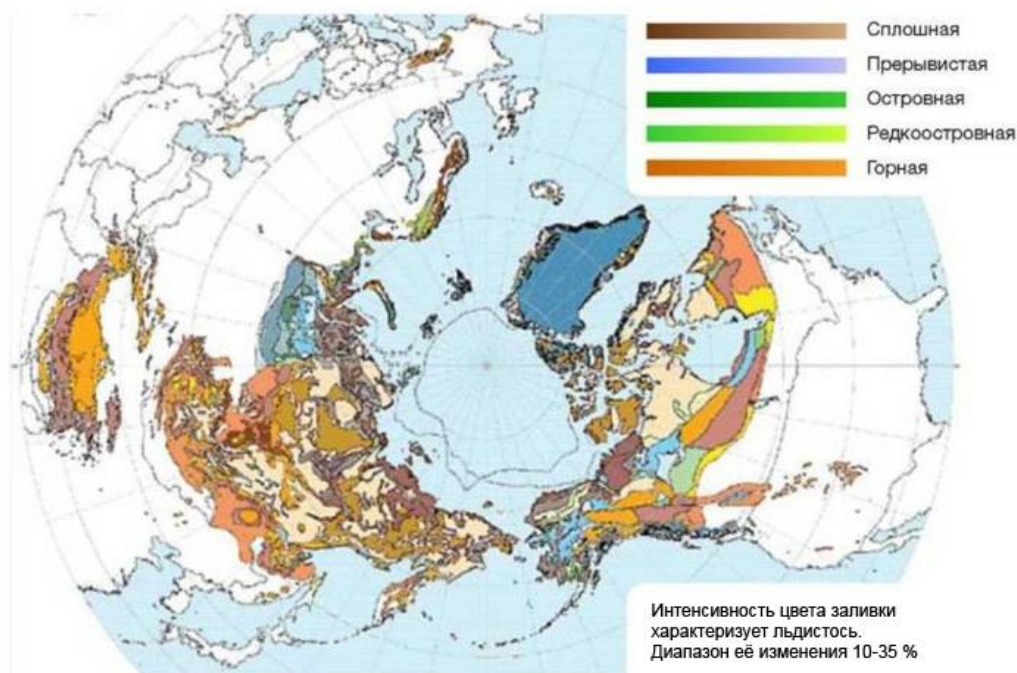


Рис. 17. Карта вечной мерзлоты [39].
Подготовлена Международной Ассоциацией Мерзловедения
на основе обобщения данных наблюдений.

«Сплошная» зона занимает большую часть Сибири от Енисея до Берингова пролива и распространяется на юг вплоть до 44° с. ш., здесь земля

**** Согласно недавнему обзору [16], разброс оценок ещё больше — он составляет от 1×10^5 до более чем $6,3 \times 10^7$ Мт С.

постоянно проморожена на глубину нескольких сотен метров. Южнее располагается зона прерывистого массивно-островного распространения вечной мерзлоты, которая охватывает от 40 до 70 % территории.

Периферийный «островной» пояс мерзлоты простирается от Кольского полуострова и Архангельской области на европейском арктическом побережье и тянется к югу до северного Китая и Монголии, а также включает в себя части Камчатки. «Острова» занимают, как правило, не более 10 % или менее от общей площади территории.

Как ни парадоксально, о «том, на чём стоим» (в буквальном смысле), мы знаем не так уж и много, а существующие оценки обладают большими погрешностями. По мнению известного шведского специалиста Т. Кристенсена, до сих пор не создано достоверной карты зоны «вечной» мерзлоты, отрывочны сведения о толщине многолетнемёрзлых грунтов (рекордная глубина залегания многолетней мерзлоты — 1370 метров — зафиксирована в феврале 1982 года в верховьях реки Вилуй в Якутии). Но бесспорно, что при деградации из слоя мерзлоты высвобождается и попадает в атмосферу метан: этот факт удостоверяется недавними измерениями, об этом подробнее будет сказано в разделе, посвящённом измерениям CH_4 . По современным оценкам [24, 26], величина потока метана, обусловленного «вечной» мерзлотой, невелика и к тому же обладает большой погрешностью: 1 Мт/год при разбросе 0—1 Мт/год^{*****}. Однако прогнозируемое ускорение темпов её разрушения, несомненно, отразится и на объёмах выбросов CH_4 в атмосферу. Масса залежей CH_4 под ледяным покровом оценивается в $2,7 \times 10^6$ Мт, но с возможной десятикратной (!) ошибкой [31].

Ещё одним источником метана в морях восточной Арктики считается его перенос крупными реками. Водосборы сибирских рек находятся на территории с наличием многолетней мерзлоты, хранящей огромные запасы органического углерода, в том числе в виде метана. «Питательным» резервуаром для Оби являются Васюганские болота, ставшие объектом всестороннего изучения в последнее время, а для Лены — озёра Колымо-Индиго-Ирской и Приморской низменностей. Как следствие, наблюдается увеличение концентраций растворённого CH_4 в районах устьев сибирских рек — Оби, Енисея, Лены. С другой стороны, поскольку транспорт метана речными водами происходит

^{*****} Она вполне согласуется с оценкой потока из ледниковых щитов и вечной мерзлоты в 2 Мт CH_4 в год, полученной в [40].

в аэробных (т. е. при наличии кислорода) условиях, некоторая его часть окисляется. В итоге, по данным экспедиций 2003—2006 гг., более 80 % придонных проб и более 50 % поверхностных проб, полученных на мелком шельфе (глубина менее 50 м), были перенасыщены растворенным метаном [41].

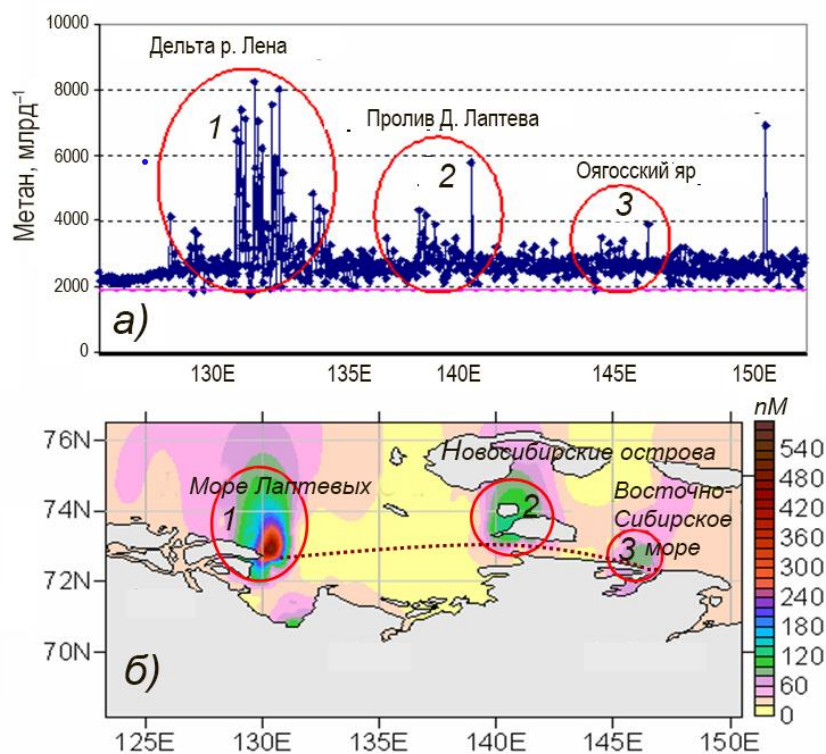


Рис. 18. Концентрации метана в приводном слое атмосферы (а) и поверхностном слое воды (б) ($\text{nM} = 10^{-9}$ моль) (сентябрь 2005 г.). На рисунке (б) пунктирной линией обозначен разрез, вдоль которого проводились измерения [42].

Особый интерес исследователей обращён к дельте Лены. По мнению специалистов, в дельте Лены, охватывающей площадь около 29 тыс. км², должна иметь место биологическая продукция, так как температура донных осадков даже в зимнее время не опускается ниже 0 °С. Лишь недавно, осенью 2013 года, здесь была открыта многопрофильная станция «Остров Самойловский», в круге задач которой есть и наблюдения за изменением климата, однако исследования в этом регионе проводятся уже более десяти лет. Группа немецких учёных изучала размеры эмиссии метана с различных типов поверхности в этом регионе [43]. «Плоды» их усилий представлены на рис. 19, который иллюстрирует, насколько поток метана в атмосферу зависит от типов рельефа и растительности, а также степени увлажнённости поверхности в низовье Лены.

На основе анализа этих результатов суммарный годовой поток метана в дельте Лены оценен величиной 28,2 тонн в год. В работах Н. Шаховой и И. Семилетова (участников нескольких морских экспедиций на российском

арктическом шельфе) фигурируют куда более внушительные величины. Однако объём информации пока явно недостаточен для окончательных выводов.

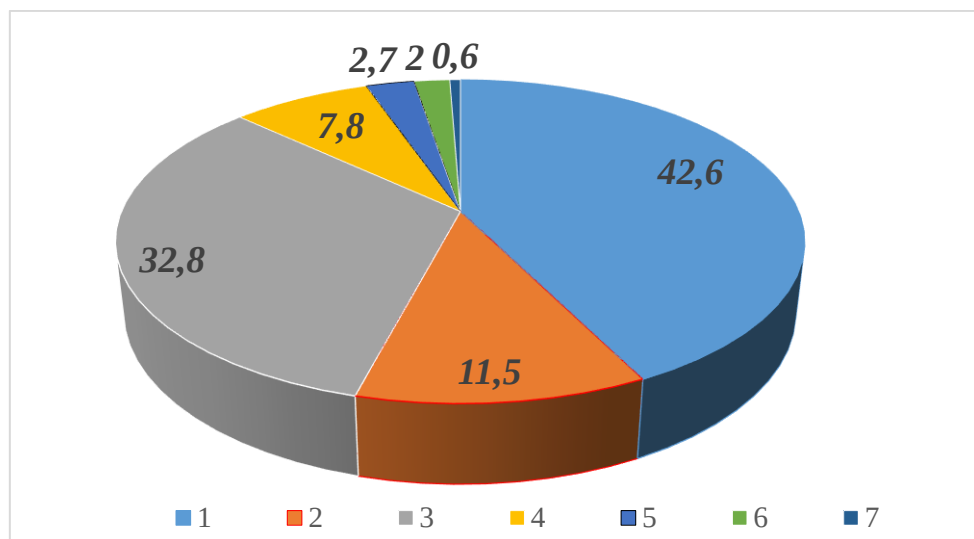


Рис. 19. Доля (в процентах) эмиссии метана с различных типов поверхности в дельте реки Лена (по данным из [43]).

1 — тундра сильно влажная с преобладанием осоки и мхов; 2 — тундра, слегка увлажненная с преобладанием травы и мхов; 3 — тундра с преобладанием карликовых деревьев и кустарников и различной степенью увлажненности (от слабой до сухой); 4 — термокарстовые озёра; 5 — все прочие озёра; 6 — побережья покрытых растительностью озёр; 7 — тундра с преобладанием сухой растительности, мхов, кочек.

Таким образом, метан бесперебойно поступает в атмосферу «через все открытые шлюзы» и, погостив в ней десяток лет и внося свою лепту в глобальное потепление, завершает своё атмосферное существование. «След» его существования оказывается достаточно весомым: по современным оценкам, общее содержание метана в атмосфере достигает примерно 4600—5000 Мт. Благодаря разветвлённой сети мониторинга, сегодня мы неплохо осведомлены о том, как эта масса распределена в земной атмосфере. Об этом, уважаемый читатель, наш дальнейший рассказ.

Где и как измеряют атмосферный метан

Сведения, обсуждаемые в предыдущих разделах, получены, можно сказать, в кабинетной тиши: в химических лабораториях (изучение метаноразрушающих реакций и оценка скоростей их протекания) или в оборудованных компьютерами помещениях (моделирование атмосферных фотохимических процессов, оценки размеров источников и стоков метана, а также вклада CH_4 в глобальное потепление и пр.). Однако, ни в коей мере не умаляя их важности и значимости, признаем, что первоосновой всего

являются натурные измерения. Они одновременно служат и отправной точкой лабораторно-теоретических исследований, поставляя необходимые фактические данные, и мерилем успешности таких исследований.

Ранее уже упоминалось, что поверхность нашей планеты покрыта измеряющими содержание в воздухе метана (и других парниковых газов) станциями далеко неравномерно. Бóльшая их часть находится в северном полушарии (поближе к «цивилизации»). Вообще задача оптимального размещения пунктов измерений возникла уже довольно давно. Её суть заключается в следующем. С одной стороны, измерения должны производиться таким образом, чтобы получаемая в соседних пунктах информация не дублировалась (зачем нужна, например, четвёртая станция, если три окрестных обеспечивают полный набор данных?). Но в то же время, сеть станций не должна быть настолько редкой, чтобы часть информации оказывалась недоступной для мониторинга. Сложность ситуации усугубляется ещё и тем обстоятельством, что наблюдения за метеоэлементами (температурой и влажностью воздуха, скоростью и направлением ветра и пр.) и парниковыми газами (включая метан) желательно производить синхронно и в одних и тех же пунктах. И это притом, что «оптимальные» положения сетей пунктов измерения метеоэлементов и содержания метана не совпадают. Надо ли говорить, что существующая сеть станций*, контролирующая содержание парниковых газов в атмосфере, едва ли отвечает требованиям оптимальности. Это связано с труднодоступностью отдельных регионов, финансовыми и кадровыми проблемами.

Однако давайте обратимся к российским реалиям. На нашей территории сегодня действует около полутора десятков пунктов, на которых регулярно проводятся измерения содержания метана в приземном воздухе, несколько станций не смогли пережить «лихих 1990-х» (см. рис. 20). Помимо стационарных пунктов, в 1995—2010 гг. для измерений использовалась передвижная лаборатория «TROICA» на базе Института физики атмосферы РАН (было произведено 14 экспериментов, охвативших практически всю российскую территорию от Москвы до Дальнего Востока) [45]. Проводились измерения на вышках в рамках японо-российского проекта (в области 51—63° с. ш., 62—129° в. д.) [46]. Периодически мониторинг метана

* Согласно [44], глобальная сеть наблюдений насчитывает 31 глобальную и 400 региональных станций, осуществляющих измерения на местах (in situ).

осуществляется над Западной Сибирью (самолетные измерения [47]), в акватории моря Лаптевых и на прилегающей территории (наблюдения с судов и борта вертолета в 2003—2009 гг. [48, 49]).

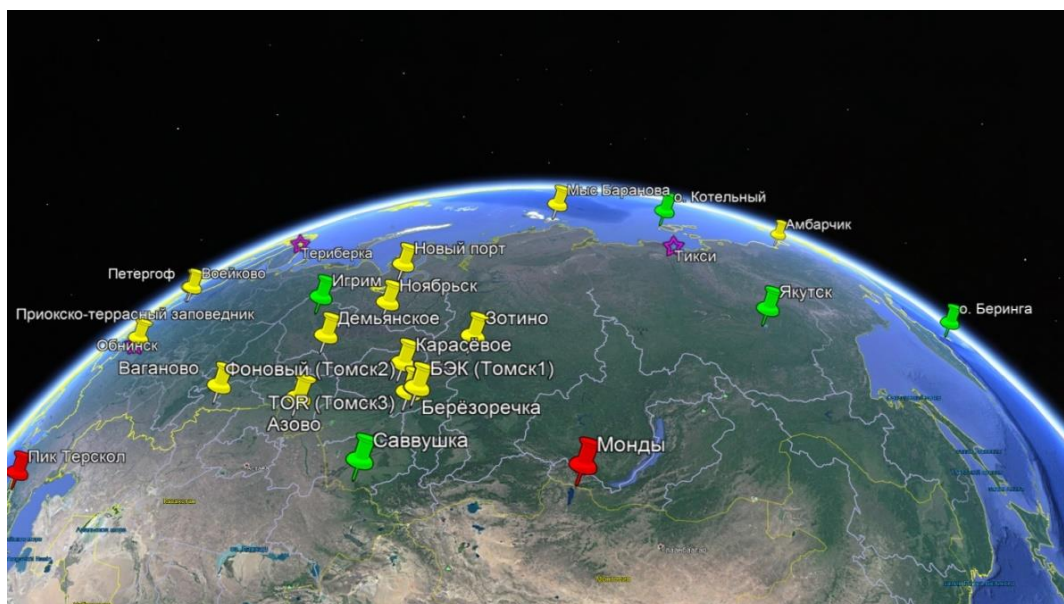


Рис. 20. Карта российских станций, на которых производятся или производились измерения концентрации метана.

Работающие станции показаны жёлтым цветом,
зелёным — ныне нефункционирующие,
красным — станции, которые планировались к открытию.
Карта создана сотрудником ГГО В. М. Иваховым.

В последние годы объектом повышенного интереса выступает теплеющая значительно быстрее, чем какой-либо другой регион Земли, Арктика. Здесь размещены около полутора десятков принадлежащих разным странам метеостанций, в круг обязанностей которых входит и мониторинг атмосферного метана (см. рис. 21). Местоположение арктических российских станций позволяет выделить местные особенности поведения концентрации метана. Так, одни из них (Териберка (Кольский полуостров) и Тикси**) можно рассматривать как фоновые, другую (Новый Порт (полуостров Ямал)) — в качестве станции, данные измерений на которой позволяют контролировать техногенные выбросы парниковых газов на близко расположенных месторождениях природного газа и нефти. Важно также и то, что станции Новый Порт и Тикси находятся в зоне сплошной многолетней

** Регулярные непрерывные наблюдения за метаном на ст. Тикси, расположенной на берегу моря Лаптевых, начаты летом 2010 г. совместно Финским Метеорологическим институтом, ГГО и NOAA/ESRL (США).

мерзлоты со множеством небольших термокарстовых озер, накладывающей отпечаток на формирование поля концентрации метана.

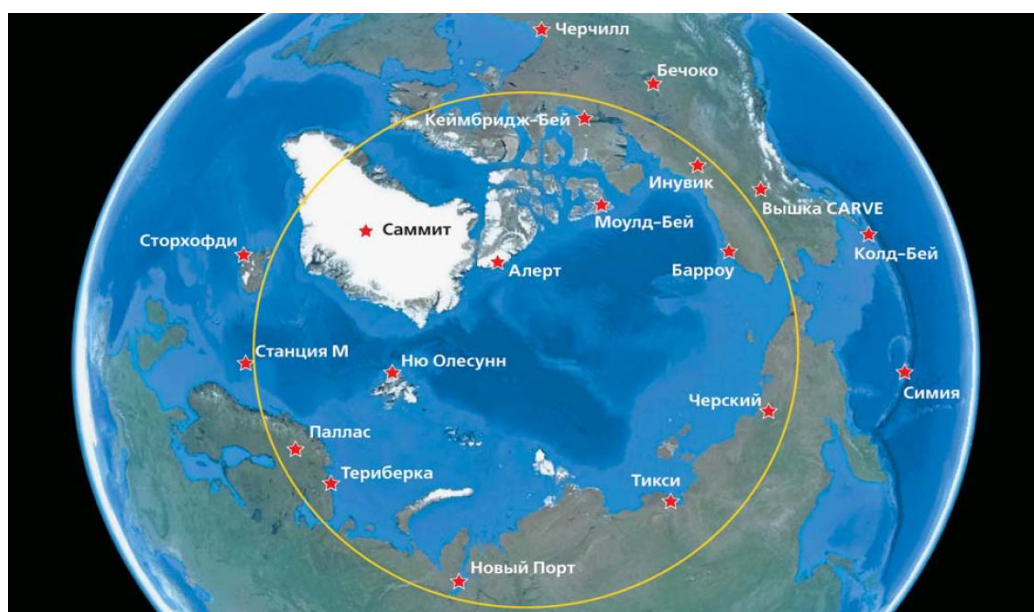


Рис. 21. Местоположение арктических и субарктических станций, измеряющих концентрацию метана в атмосфере. Желтым цветом показана линия Северного полярного круга.

В последние десятилетия вышеупомянутая проблема неоптимальности размещения наземных станций, измеряющих содержание CH_4 в атмосфере, отчасти решена благодаря налаживанию спутникового мониторинга. С этой целью бороздили и продолжают бороздить космические просторы спутники: европейский ENVISAT (запущен 1 марта 2002 г.)^{***}, американские AQUA (4 мая 2002 г.), AURA (15 июля 2004 г.), OCO-2 (2 июля 2014 г.), японский GOSAT (23 января 2009 г.) и GOSAT-2 (29 октября 2018 г.).



Рис. 22. Спутник GOSAT (Япония), предназначенный для измерения содержания CO_2 и CH_4 , производит замеры в 56000 точках атмосферы (<https://mipt.ru/upload/ba8/go-arpfppx04a8.jpg>).

^{***} Объявлен погибшим 9 мая 2012 г.

Теперь, когда Вы, уважаемый читатель, немного познакомились с «метаноизмерительной географией», пора поговорить о том, как эти измерения осуществляются. Есть две основные категории наблюдательных методов: контактные и дистанционные. Контактные методы позволяют определить концентрацию примеси в данной точке пространства и в данный момент времени. Десятилетиями на наземных станциях с заданной регулярностью (еженедельно или ежемесячно) производился отбор проб воздуха во фляги (flasks, по-английски), которые в последующем доставлялись в газоаналитическую лабораторию и подвергались обработке и определению в них концентрации метана. Такой вид наблюдений называется регулярным мониторингом. Основным достоинством регулярного мониторинга является его географический охват. Отбирать пробы воздуха значительно проще, чем проводить измерения непосредственно на месте (in situ). Позже, по мере совершенствования приборной базы и методов наблюдений, концентрацию метана в приземном воздухе стали определять посредством автоматических газоанализаторов, расположенных на станциях. Долгое время наиболее распространенным методом определения молярной доли метана была газовая хроматография. Но в последнее десятилетие пальму первенства перехватывают газоанализаторы на основе методов лазерной спектроскопии, которые значительно проще в обслуживании. Тем не менее, например, на арктических станциях (см. рис. 21) сохраняются регулярные наблюдения с помощью фляг, поскольку таким образом сохраняется единство измерений на всей сети (к тому же воздух во флягах анализируется ещё на содержание других малых газовых компонент атмосферы). Одновременно примерно на половине из них налажен ежечасный мониторинг концентрации CH_4 , а на трёх (мыс Барроу на Аляске, гидрометеорологическая обсерватория Тикси в дельте Лены и обсерватория Цеппелин на Шпицбергене) такой мониторинг идёт непрерывно. Стационарные контактные методы, используемые на станциях, дополняются мобильными наблюдениями, когда пробозаборное оборудование или газоаналитическая установка располагаются на подвижной платформе, например, на автомобиле, самолете или корабле.

Однако то, что успешно работает «на местах», принципиально не применимо в космосе. Поэтому синхронно с развитием спутниковой техники стали активно развиваться методы дистанционного зондирования. Дистанционные методы измерений позволяют определить интегральное (общее)

содержание метана в столбе воздуха, необходимое для оценки качества (валидации) спутниковых измерений. В таких наблюдениях используются методы оптической спектроскопии****. В основе таких методов, применительно к измерению содержания CH_4 в тропосфере, лежит ослабление излучения в спектральных диапазонах, соответствующих максимумам полос поглощения метана (см. рис. 6). В начале XXI века, в частности, на спутнике ENVISAT, такие измерения ограничивались атмосферой над сушей в светлое время суток, поскольку использовали солнечное излучение, проходящее через толщу атмосферы и отражаемое подстилающей поверхностью. Таким образом, вне «их зоны внимания» оказывались и затенённая сторона Земли, и океаны (занимающие 71 % земной поверхности), и Арктика, поскольку там даже летом Солнце находится низко над горизонтом, не говоря уже о полярной ночи. Другой метод, «метод тепловой радиации», основан на измерении поглощения излучения поверхности Земли и её атмосферы в инфракрасном диапазоне. Использование линий поглощения метана в этой области спектра позволяет получать данные о его содержании в атмосфере вне зависимости от времени суток и от типа поверхности (суша или море). Но и в этом случае нельзя утверждать, что спутниковый мониторинг полностью покрывает земную поверхность. Процитируем Л. Юрганова, долгие годы исследующего поведение CH_4 по спутниковым данным [50]: «Важное ограничение метода тепловой радиации — необходимость достаточно высокого температурного контраста между земной поверхностью и атмосферой: поверхность должна быть существенно теплее, чем воздух над ней. Температурный контраст в зимнее время падает из-за охлаждения поверхности до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже. И прибор, установленный на спутнике, теряет чувствительность к приземной атмосфере, где максимальны аномалии метана. В первую очередь это происходит над сушей в таких районах, как Сибирь и Арктика. Минимально возможная температура океана, напротив, близка к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. По этой причине над Северным Ледовитым океаном низкий температурный контраст наблюдается только над паковым (многолетним) льдом, который изолирует тёплый океан от холодного воздуха над ним. В случаях тонкого льда или просто над открытой поверхностью моря температурная разница между поверхностью

**** Также существуют лидарные измерения, но они, главным образом, используются для обнаружения утечек метана.

и атмосферой достаточно велика в течение всего года. Это открывает возможность круглогодичного мониторинга метана над значительной частью Северного Ледовитого океана».

Налаживание спутникового мониторинга не отменяет потребности в поддержании и развитии наземной сети станций. Дело в том, что погрешность спутниковых данных достаточно велика: для ENVISAT она оценивалась 50—70 млрд⁻¹ для отдельного измерения и 9—16 млрд⁻¹ для среднемесячных значений, а для GOSAT — 14—18 млрд⁻¹ и 1—2 млрд⁻¹ соответственно. Во всех измерениях, произведённых на наземных станциях, точность значительно выше, погрешность, как правило, не превышает 0,5—1 млрд⁻¹ (см., например, [51]). Поэтому именно они полностью обеспечивают доказательство доброкачественности (валидацию) бесперебойно поступающей спутниковой информации.

Однако, как известно, сколько не говори «халва», во рту слаще не станет: пора ознакомить Вас, уважаемый читатель, непосредственно с результатами работы всего вышеупомянутого комплекса средств измерений, то есть сообщить, каково оно, содержание метана в атмосфере.

И вот что получилось

Сразу оговоримся: приводимые ниже результаты измерений концентрации метана не являются «свежими новостями с «метановых полей». Они были получены и опубликованы в последние годы и десятилетия разными группами исследователей с использованием различных методик. Наша главная цель — дать Вам, уважаемый читатель, общее представление о том, насколько богато метаном воздушное пространство над теми или иными регионами Земли, и каковы современные тенденции его эволюции.

Ранее Вы имели возможность убедиться, что прошлый век и начало нынешнего ознаменовались беспрецедентно быстрым ростом содержания в атмосфере «главных» антропогенных парниковых газов — CO₂ и CH₄ (см. рис. 5). Начиная с доиндустриального периода, атмосферная концентрация метана увеличилась примерно в 2,57 раза (а CO₂ — в 1,45 раза). Как справедливо подметил поэт, «большое видится на расстоянии», однако сейчас попытаемся рассмотреть это «большое» вблизи. Скорость прироста содержания метана в атмосфере не была одинаковой (см. рис. 23).

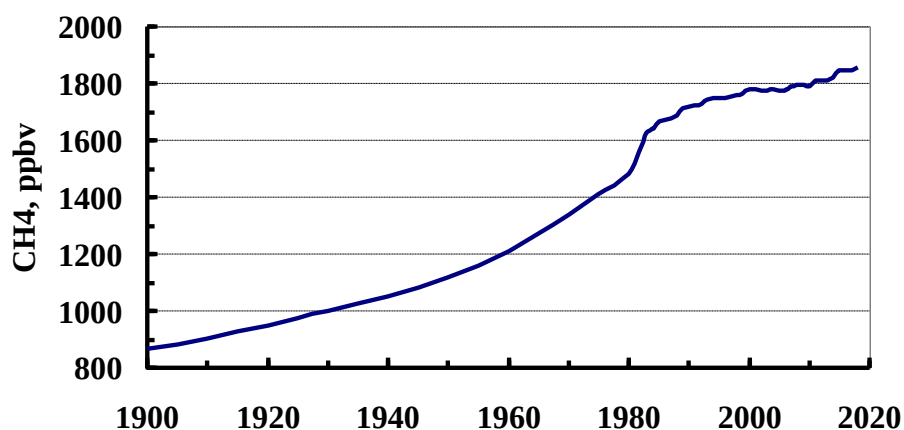


Рис. 23. Среднеглобальная концентрация метана у поверхности Земли (млрд^{-1}) в период 1900—2017 гг. (по данным [52]).

Она возрастала с середины XX века, достигнув своего максимума в 1980-х ($\sim 14 \text{ млрд}^{-1}$ в 1984 г. и более 10 млрд^{-1} на протяжении 1983—1991 гг.), причиной такого роста сочли резкое увеличение антропогенных выбросов в послевоенные годы, в том числе от советской газовой промышленности [53]. Затем темпы роста снизились, чему, возможно, поспособствовало существенное сокращение утечек метана из газовой отрасли [53]. А в период 2000—2007 гг. его и вовсе можно считать «символическим» (0,6 % за восемь лет). О том, чем обусловлена эта «стабилизация», сегодня нет единого мнения. За последние 10 лет снова наблюдается более интенсивный ежегодный прирост концентрации метана (примерно на треть процента). В качестве причин такого прироста называются рост выбросов CH_4 от сельскохозяйственной деятельности [54, 55] и от сжигания топлива [56], вариации содержания в атмосфере гидроксильного радикала — главного фотохимического разрушителя метана [57]. Также высказывается версия об определяющей роли роста эмиссии CH_4 от тропических переувлажнённых территорий [54, 58], но это один из наименее изученных естественных источников, главным образом, из-за недостатка там наблюдений.

Хотя на рис. 23 представлена эволюция отношения смеси CH_4 в приземном воздухе, следует отметить, что оно мало изменяется с ростом высоты в тропосфере, но начинает убывать в стратосфере: уже на уровне 30 км происходит его приблизительно двукратное сокращение (см. рис. 24).

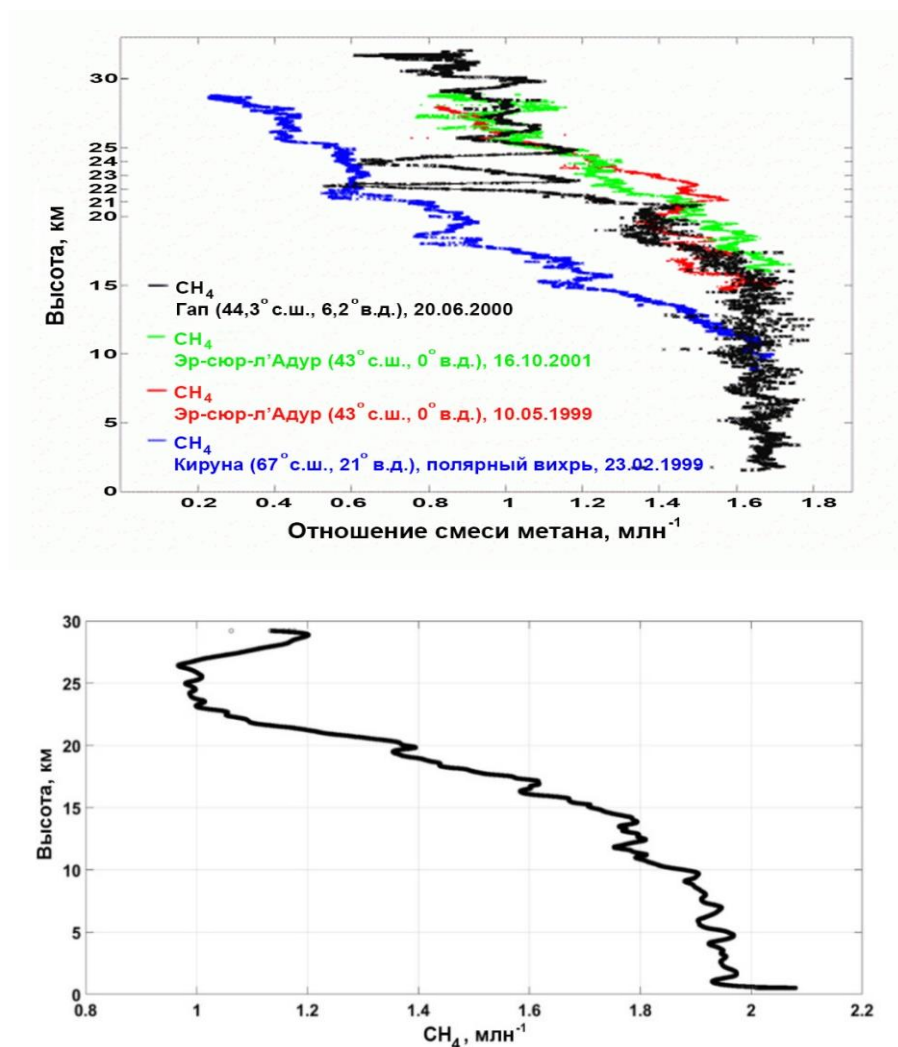


Рис. 24. Примеры вертикальных профилей концентрации метана (млн^{-1}) в тропосфере и нижней стратосфере средних и северных широт, измеренных спектрометром, в 1999—2001 гг. [59] (сверху) и в 2016 г. в Кируне [60] (снизу).

Показанные в верхней части рис. 24 вертикальные профили концентрации метана были измерены в разные сезоны и на разных широтах. Однако это обстоятельство не имеет решающего значения, и вот почему. С одной стороны, характерное время переноса воздушных масс внутри одного полушария в 50—100 раз меньше атмосферного «времени жизни» CH_4 , и, как результат, все приземные значения мало отличаются друг от друга*. С другой стороны, сезонный ход концентрации метана очень невелик (он максимален над сушей средних и субполярных широт северного полушария (30—40 млрд^{-1}),

* Слежение за перемещением метана с воздушными массами производится с помощью анализа изотопного состава (измерениям доли изотопа ^{13}C). Согласно исследованию [61], в пробах метана, взятых на Шпицбергене в конце лета 2008 и 2009 гг., находился CH_4 , образовавшийся в биогенных источниках на самом острове и ближайших материковых (лесных и тундровых) областях. Однако весной и в первой половине лета, когда тундровые и болотные поверхности еще покрыты снегом и льдом, в пробах преобладает «ископаемый» метан, очевидно, из газовых месторождений севера Западной Сибири.

для среднеглобальной среднемесячной концентрации он лишь составляет 10—25 млрд⁻¹, т. е. величину порядка 1 % (см. рис. 25), причём на летне-осенний период, когда концентрация контролирующего сток CH₄ гидроксильного радикала максимальна, приходится минимум содержания метана. Если же сопоставить значения концентрации метана в Кируне в верхней и нижней частях рисунка 24, нетрудно убедиться в её заметном увеличении, произошедшем за 17 лет.

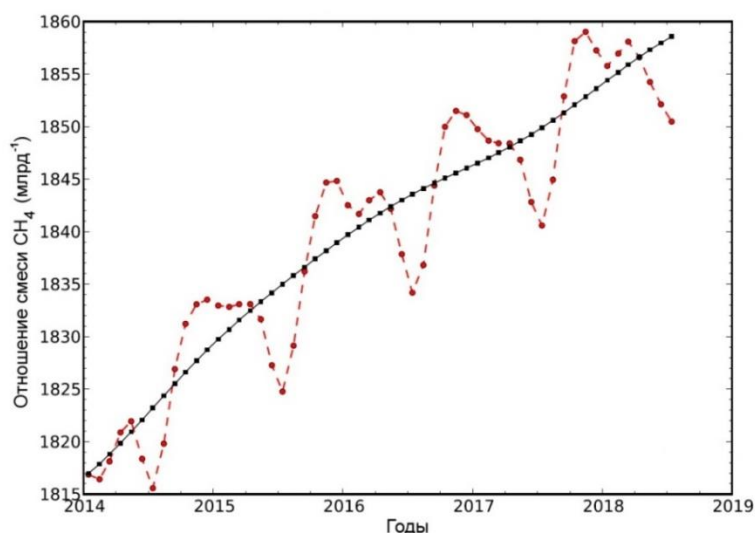


Рис. 25. Сезонный ход среднеглобальной среднемесячной концентрации метана (млрд⁻¹) в 2014—2018 гг. [62].

Характерное время переноса воздушных масс из одного полушария в другое составляет несколько месяцев, поэтому концентрация CH₄ в северном полушарии, где находятся все его основные источники, превосходит концентрацию южного полушария (см. рис. 26).

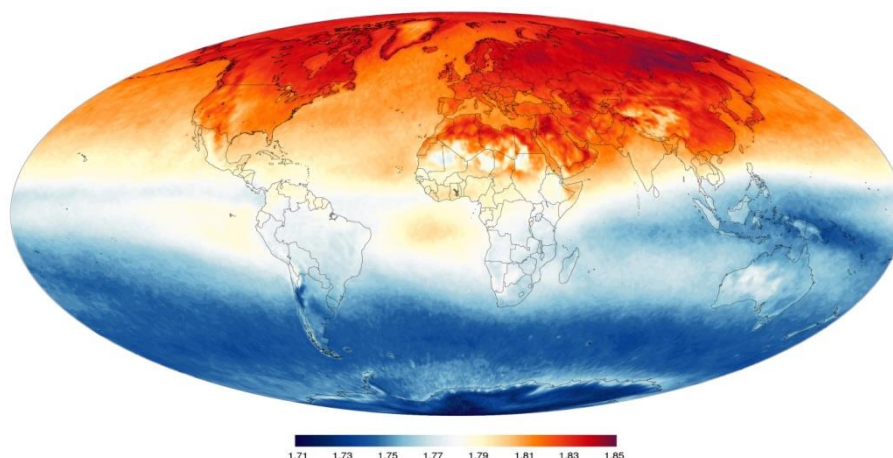


Рис. 26. Распределение концентрации метана в приземном воздухе (млн⁻¹) по поверхности земного шара в 2011 г., согласно данным спутника AQUA [63].

Нелишне заметить, что разница в значениях невелика: средняя концентрация CH_4 в южном полушарии всего на 6 % ниже (опять же сказывается «долгожительство» метана). При этом падение концентрации в направлении с севера на юг более интенсивно происходит в северном полушарии (см. рис. 27). Однако характер её изменений в XXI веке практически идентичен во всех широтных поясах: отчётливо видны и «застой» 2000—2007 гг., и последующее возобновление роста. Рис. 27 подтверждает также и то, что показанное на рис. 26 географическое распределение концентрации метана в равной степени характерно не только для 2011 года, но и для любого другого в XXI веке.

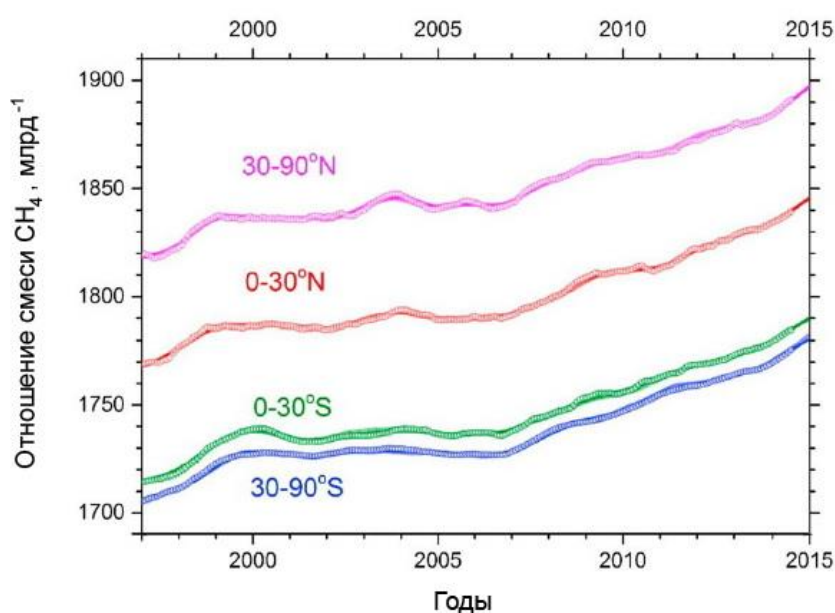


Рис. 27. Непрерывные средние показатели отношения смеси метана в приземном воздухе за 12 месяцев, по данным Совместной глобальной сети отбора проб воздуха NOAA, осреднённым по регионам для каждого полушария, лежащим на широтах 0—30° и 30—90° [54].

Перейдём от глобального «целого» к российскому «частному».

В качестве примера рассмотрим результаты измерений концентрации метана в течение последнего двадцатилетия на двух станциях, расположенных в наиболее густонаселённой части нашей страны — Обнинск и Воейково (см. рис. 28). Обе эти станции расположены недалеко от крупных мегаполисов: первая приблизительно в 100 км от Москвы (и в 70 км от Калуги), вторая — в 11 км от Санкт-Петербурга. В целом содержание CH_4 в указанных районах измерений примерно одинаково, лишь в 1999—2004 гг. наблюдалось устойчивое небольшое преобладание обнинских значений над воейковскими.

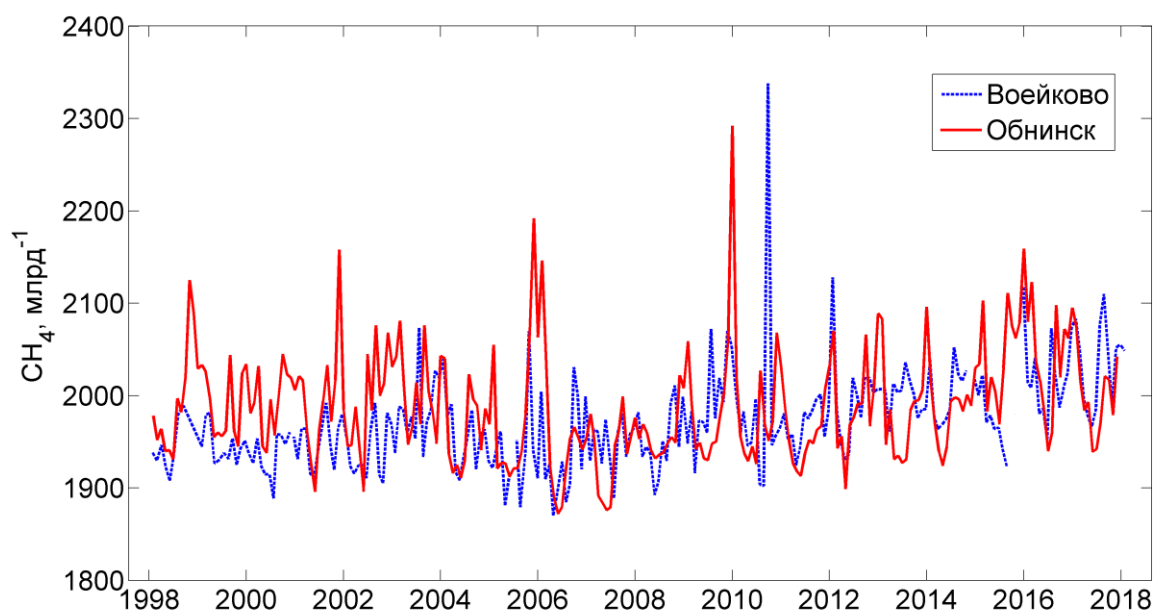


Рис. 28. Среднемесячные значения концентрации метана (млрд⁻¹) в приземном воздухе, измеренные на станциях Обнинск (55°06' с. ш., 36°37' в. д.) [64] и Воейково (59°57' с. ш., 30°42' в. д.) в 1998—2018 гг.
Рисунок подготовлен сотрудником ГГО В. М. Иваховым.

Для сравнения обратимся к данным наблюдений, проведённых в Западной Сибири (см. рис. 29). При открытии, 25 лет назад, станция находилась на окраине Томска, точнее: на северо-восточной окраине Академгородка. Однако в последующие годы вследствие интенсивной застройки она стала, по сути, городской станцией, поэтому здесь имела место постоянно возрастающая антропогенная нагрузка.

На рис. 29 отчётливо видны зимние максимумы концентрации метана, иногда, когда имеют место лесные пожары и случаи атмосферного блокирования, такие максимумы появляются и летом. В среднем за период 2012—2017 гг. рост концентрации CH_4 составлял 8,5 млрд⁻¹ в год.

В данных измерений на всех трёх станциях присутствует «городская» составляющая, в этом можно убедиться, сопоставив концентрации метана, зафиксированные в Обнинске, Воейково и Томске, с приведёнными на рис. 30 концентрациями CH_4 , измеренными на удалении от крупных локальных источников — в Териберке и Тикси.

Близость источника метана к станции наблюдений прекрасно проявляется при сравнении результатов измерений его концентрации на российских арктических станциях (см. рис. 30).

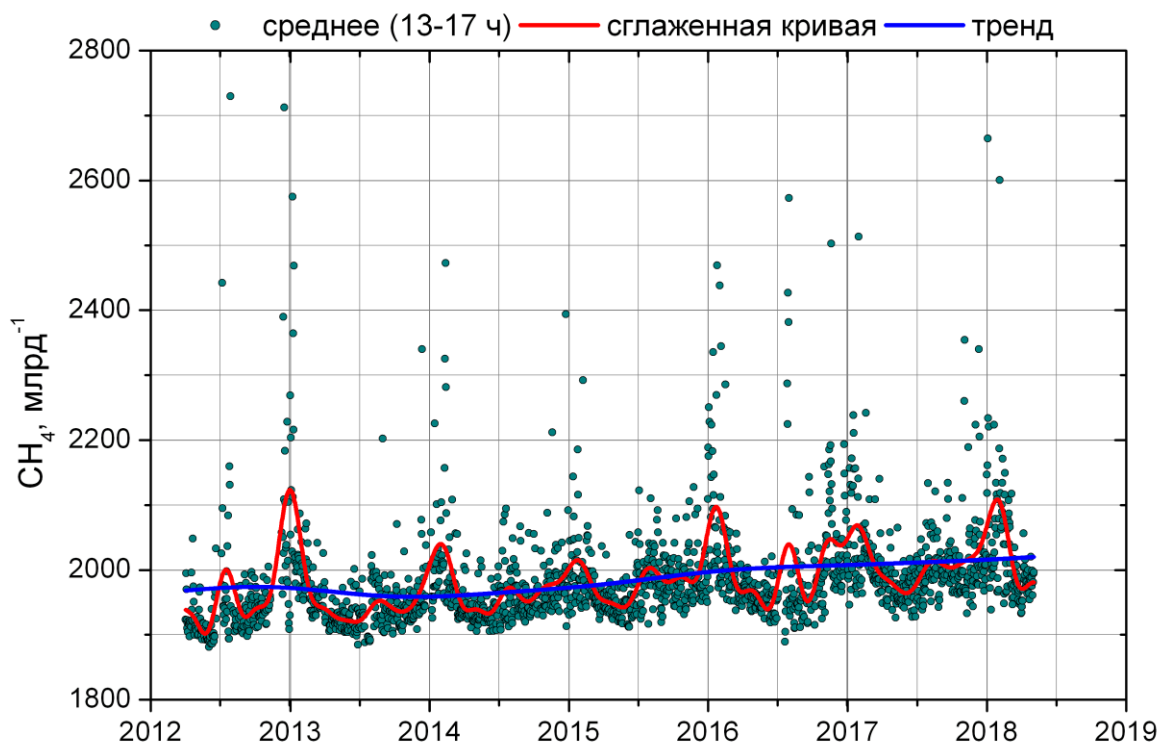


Рис. 29. Среднедневные значения концентрации CH_4 , измеренные на станции, расположенной на северо-восточной окраине Академгородка г. Томска ($56^\circ 28' 41''$ с. ш., $85^\circ 03' 15''$ в. д.) [65].

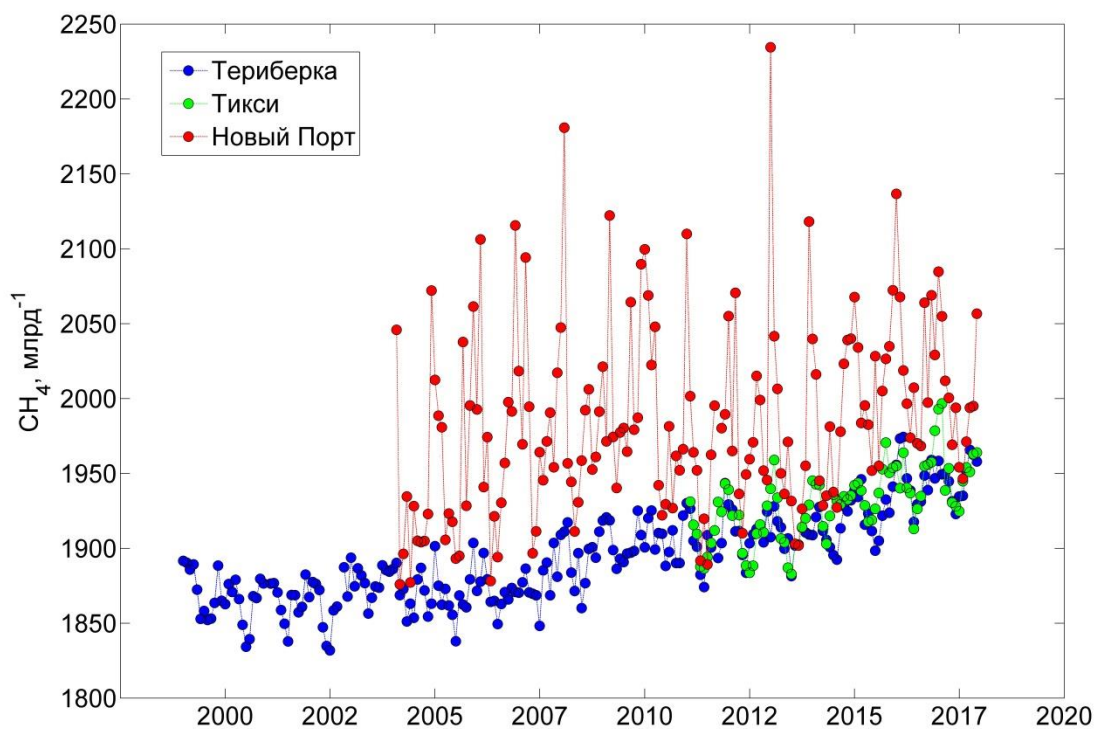


Рис. 30. Среднемесячные значения концентрации метана (млрд⁻¹) в приземном воздухе по измерениям на трёх российских арктических станциях в XXI веке. Рисунок подготовлен сотрудником ГГО В. М. Иваховым.

Данные фоновых станций (Териберка и Тикси) близки как друг к другу, так и к данным зарубежных арктических станций. Но концентрации CH_4 , измеренные на станции Новый Порт, расположенной в окрестности месторождений природного газа и нефти, систематически заметно выше, и они всегда превосходят фоновые значения; наличие многочисленных пиков здесь обусловлено не только интенсивностью источников метана, но и розой ветров в этом регионе.

Другой пример, иллюстрирующий, как сказывается близость источника CH_4 на его концентрации, представлен на рис. 31. Показанные на нём измерения проводились 31 июля — 1 августа 2012 г. с борта самолёта Ту-134, совершавшего полёт по маршруту Новосибирск — Томск — Мирный — Якутск — Братск — Новосибирск, и сравнивались с проведёнными предыдущим летом измерениями на той же трассе. Как известно, 2012 г. был отмечен значительным числом лесных пожаров в этом регионе, вносящих свой вклад в эмиссию не только метана, но также двуокиси и окиси углерода. Поэтому представленные на рис. 31 превышения над фоновой концентрацией CH_4 со всем основанием можно считать следствием той напряжённой пожарной обстановки.

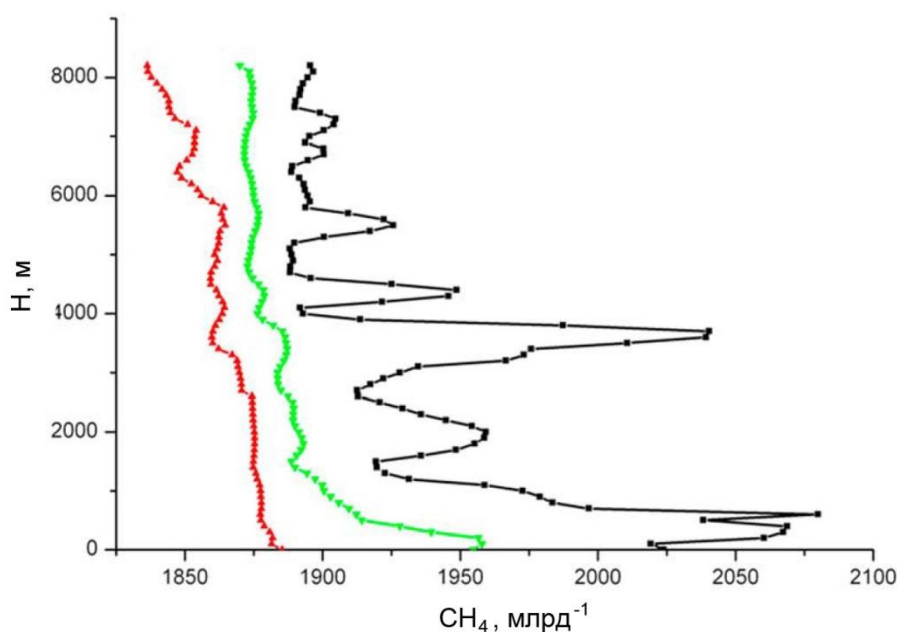


Рис. 31. Вертикальные профили фоновой, средней и максимальной (красная, зелёная и чёрная линии соответственно) концентрации метана, измеренной в ходе полёта самолёта Ту-134 по маршруту Новосибирск — Томск — Мирный — Якутск — Братск — Новосибирск 31 июля — 1 августа 2012 г. [66].

Таким образом, с полным правом можно констатировать, что налаженный за последние десятилетия мониторинг содержания CH_4 в атмосфере «нарисовал» достаточно полную (хотя и не лишённую недостатков) картину поведения метана как в отдельных регионах, так и в земной атмосфере в целом.

Что век текущий нам готовит?

Снова прибегнем к спортивной аналогии. Выступлению каждого атлета на крупном соревновании предшествует длительная всесторонняя тренировочная подготовка, создающая базу его успеха в турнире. В некотором смысле всё, о чём было рассказано выше, можно сравнить с такой подготовкой. Действительно, сведения о свойствах метана, особенностях и причинах эволюции его концентрации в атмосфере, даже о вкладе в современные изменения климата ценны, прежде всего, тем, что дают нам возможность из анализа прошлого и настоящего добиться успеха в оценке будущих перспектив*. Именно обеспечение способности предвосхитить развитие ситуации, а, значит, и своевременно отреагировать на него, является главной приоритетной целью исследований «метаносферы», да и всей климатологии.

Однако только одного тренировочного процесса для победы может и не хватить, необходимо ещё выбрать оптимальную тактику ведения поединка. В нашем случае необходимость определиться — не только качественно, но и количественно! — где, когда и сколько метана будет поступать в атмосферу в обозримом будущем. Конечно, проще всего предположить, что сохранятся ныне наблюдаемые тенденции к росту эмиссии CH_4 . Вот только много ли у нас оснований считать такой сценарий единственно верным? Разумеется, нет! Ввиду наличия огромного количества обратных связей, ускоряющих или подавляющих атмосферные процессы, усиления или ослабления продуктивности источников метана, международных ограничений антропогенных выбросов и пр., темпы как поступления CH_4 в атмосферу, так и его химического разрушения могут изменяться в весьма широких пределах. Поэтому специалисты рассматривают *набор* сценариев, каждый из которых построен в предположении определённого

* Говоря о перспективах, мы имеем в виду сроки порядка нескольких десятилетий, поскольку каждая наука оперирует в рамках своих временных масштабов. Например, для ботаники это дни, месяцы или годы, для геофизики или геологии — десятки и сотни тысяч лет. Для климатологии таким характерным масштабом времени является десятилетие.

развития мировой экономической ситуации (то есть в основном учитываются лишь возможные вариации антропогенных источников метана). До недавнего времени число таких сценариев достигало трёх с половиной десятков, но в последние годы используются *четыре базовых сценария* нового поколения RCP 8.5, RCP 6.0, RCP 4.5, RCP 2.6^{**}. Аббревиатура RCP расшифровывается как Representative Concentration Pathways (в русском переводе — характерные пути [изменения] концентраций [газов]). Здесь в квадратных скобках указаны части названия, подразумеваемые, но не включенные в него явно. Цифры указывают на ожидаемую величину радиационного форсинга (в Вт/м²) в 2100 г. от начала «индустриальной эпохи». Из этих цифр следует, что RCP 8.5 представляет сценарий с максимальными антропогенными выбросами, а RCP 2.6 — с минимальными (в целом с максимумом в 3 Вт/м², происходящим до окончания века и уменьшающимся до 2,6 Вт/м² к 2100 г.). По сегодняшним представлениям, наиболее адекватными действительности являются сценарии RCP 4.5 и RCP 6.0, два остальных сценария задают нижний и верхний пределы возможных изменений.

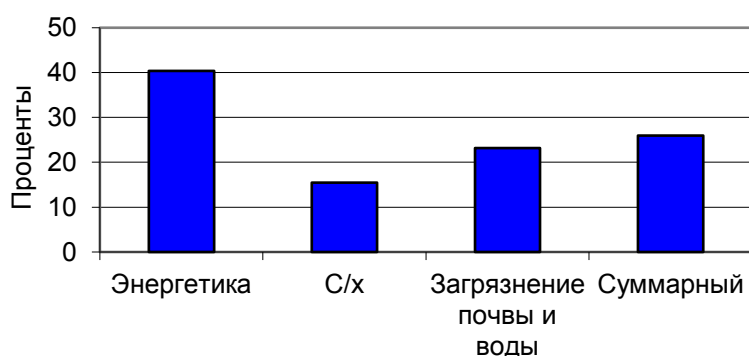


Рис. 32. Оценка роста глобальной антропогенной эмиссии метана за период 2005—2030 гг. из трёх основных источников и суммарного по данным Американского Агентства по охране окружающей среды (US Environmental Protection Agency) [68].

Если говорить о перспективах развития ситуации в ближайшее десятилетие, то прогноз Американского Агентства по охране окружающей среды

^{**} Все предыдущие сценарии строились по принципу: «предположим размер эмиссии, чтобы оценить, к чему это приведёт». Идеология, закладываемая в сценарии нового поколения, иная: «зададим предельно допустимую планку изменения климата, чтобы оценить, при каких условиях (эмиссиях) удастся остаться в заданных границах». Другими словами, если прежде в рамках предположений о развитии народонаселения, экономики, экологии и т. д. выстраивались сценарии выбросов парниковых газов, то теперь социально-экономическое развитие ограничивается лимитом на такие выбросы, обеспечивающим невыход за установленную границу изменений климата.

к 2030 г. предполагает продолжение интенсивного роста эмиссии CH_4 из основных антропогенных источников (см. рис. 32), при этом суммарный антропогенный источник должен возрасти на 26 %.

К обсуждению сценариев вернёмся чуть позже, а пока укажем на некоторые аспекты, порождающие погрешности как в самих сценариях, так и в сделанных на их основе модельных оценках.

Несомненно, существует связь между интенсивностью естественных выбросов CH_4 и изменениями климата, причём связь двусторонняя (как климат влияет на размер выбросов, так и насыщение атмосферы метаном отражается на состоянии климата). Известно, что производство метана во влажной почве (в том числе болотах) увеличивается с ростом температуры. Об естественных источниках метана сведений значительно меньше, чем об антропогенных. Особенно это справедливо для часто труднодоступных для мониторинга тропиков, где осуществляется почти $2/3$ глобальной эмиссии метана. Как следствие, сегодня нет ясного представления о том, как будет изменяться естественный источник CH_4 в будущем.

Другим существенным фактором неопределённостей является недостаточность наших знаний о поведении в атмосфере основного разрушителя молекул метана — гидроксильного радикала OH . Согласно оценкам [67], с доиндустриальных времён содержание OH возросло: оно выросло на 46 ± 12 % (как результат роста антропогенной эмиссии $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) и одновременно сократилось на 17 ± 2 , 8 ± 2 и 3 ± 3 % (из-за роста содержания CH_4 , CO и летучих органических соединений соответственно). Прямым следствием роста концентрации OH является убывание «времени жизни» метана в атмосфере (опять же по модельным оценкам — с 1850 по 1995 гг. на 19,2 % [69], а с 1980 по 2000 гг. $4,3 \pm 1,9$ % [25]). Специалисты в целом сходятся в том, что в будущем содержание OH будет расти, а время жизни CH_4 убывать, но весь вопрос — с какой скоростью?

Много неясности с темпами и последствиями таяния вечной мерзлоты. В условиях, когда потепление в Арктике происходит значительно интенсивнее, чем в какой-либо другой области Земли, неизбежно ускорение деградации многолетнемерзлых грунтов, за которой последует высвобождение накопленного в них столетиями метана. Однако это лишь одна «сторона медали» — с повышением температуры «зимовавшие» в этих грунтах и доселе «законсервированные» анаэробные бактерии оживут и возобновят производство

метана. Сколь плодотворно пойдёт это производство, сказать трудно: для обоснованных выводов соответствующих оценок пока недостаточно. Другим последствием потепления является увеличение числа пожаров. Мало того, что они являются непосредственными источниками метана (см. табл. 2 и 4), возникновение пожаров дестабилизирует верхний слой почвы, ускоряя протаивание вечной мерзлоты и (снова!) работу микробиологических ресурсов: наблюдения показали, что несколько пожаров на Аляске привели к росту эмиссии метана из почвы на 7—142 % [16]. В целом большинство исследователей сходятся в том, что обратная связь «поток метана из вечной мерзлоты — климат» всё же не является определяющей, и конкурирующие с ней другие обратные связи существенно сильнее. Диссонансом выглядит мнение о том, что в XXI веке главным источником парниковых газов (включая метан) в Арктике станут появляющиеся на Аляске и в Сибири термокарстовые озёра (в результате быстрого таяния снега и верхнего слоя вечномёрзлых грунтов в тундре) [70]. Такие озёра аккумулируют тепло, усугубляя деградацию вечной мерзлоты (если обычно ежегодная скорость оттаивания составляет несколько сантиметров, то под термокарстовыми озёрами — до одного метра). По мнению авторов [70], такой «термокарстовый» источник CH_4 может сравниться с источником от агроиндустрии.

Разумеется, перечень обстоятельств, влияющих на точность прогнозов грядущих изменений газового состава атмосферы и климата, гораздо шире, но, надеемся, даже приведённых выше примеров достаточно, чтобы понять, что, с одной стороны, наши знания далеко не совершенны, но, с другой, всё же отвечают нынешнему уровню развития науки и вполне достаточны для получения ответов на вопросы о вероятных трендах эволюции климата — ответов, которые в последующем должны дополняться и улучшаться.

Итак, возвращаемся к современным сценариям. Как было сказано выше, они прогнозируют эволюцию лишь суммарного антропогенного источника метана, а величину его естественной составляющей считают неизменной и равной значению, соответствующему 2010 г. (202 ± 35 Мт/год). На рис. 33 показано, как в рамках сценариев RCP изменятся в ближайшие десятилетия антропогенная эмиссия и соответствующее ей содержание CH_4 в атмосфере. Только в сценарии с максимальными выбросами (RCP 8.5) предполагается монотонный рост антропогенных выбросов CH_4 в течение всего XXI века, в остальных же сценариях с некоторого момента (в каждом сценарии своего) они

начинают сокращаться. Эволюция концентрации метана CH_4 практически синхронна эволюции его антропогенных выбросов (что неудивительно, ввиду сравнительно короткого «времени жизни» метана). Как результат, к концу века концентрация метана примерно удвоится в сценарии RCP 8.5, сохранится приблизительно на современном уровне в сценариях RCP 6.0 и RCP 4.5 и лишь в сценарии RCP 2.6 уменьшится почти вдвое. Подсчитано, что каждый раз прирост содержания CH_4 в атмосфере на 2,77 Мт вызывает увеличение его концентрации на 1 млрд⁻¹.

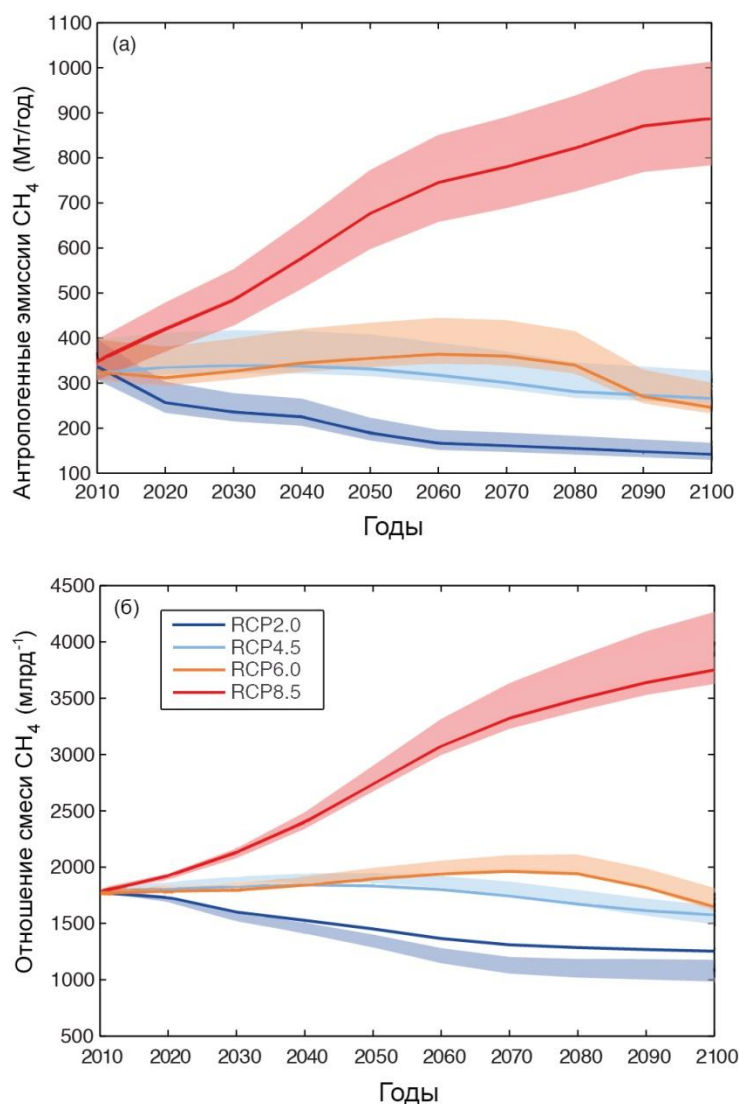


Рис. 33. Ежегодные антропогенные выбросы метана в течение XXI века согласно четырём сценариям RCP (а, Мт/год) и соответствующие этим выбросам среднеглобальные концентрации CH_4 (б, млрд⁻¹) [5].

Сплошные линии соответствуют сценарным значениям, штрихованные области — вероятному разбросу значений вследствие неопределённостей в оценках антропогенной эмиссии.

Сценарные значения, характеризующие эволюцию содержания парниковых газов (всех, а не только метана), были использованы

климатическими моделями (для отдельных сценариев их число колебалось от 25 до 42) в расчётах приземной температуры воздуха в течение XXI века. Результаты этих расчётов показаны на рис. 34. Здесь среднее по данным измерений значение приземной температуры в период 1986—2005 гг. принято за исходное, относительно которого вычисляются отклонения в последующие годы. «Шлейф» температурных аномалий 2005—2050 гг. на рис. 34 образован линиями, каждая из которых соответствует расчёту конкретной модели по одному из сценариев (каждый сценарий показан своим цветом). Разумеется, невозможно вычленить какую-то отдельную линию, но составить общее впечатление можно без особого труда. Очевидно, чем более «жёсток» сценарий, тем меньше оказывается прирост температуры (синие линии (сценарии RCP 2.6 и RCP 4.5) преобладают в нижней части «шлейфа»): к 2050 г. он в большинстве случаев не превышает 1,5 °С. А при реализации «щадящих» сценариев RCP 6.0 и особенно RCP 8.5 (красные линии) температура должна возрасти на 2 °С и более (то есть превзойти предельные рубежи, обозначенные Парижским соглашением по климату).

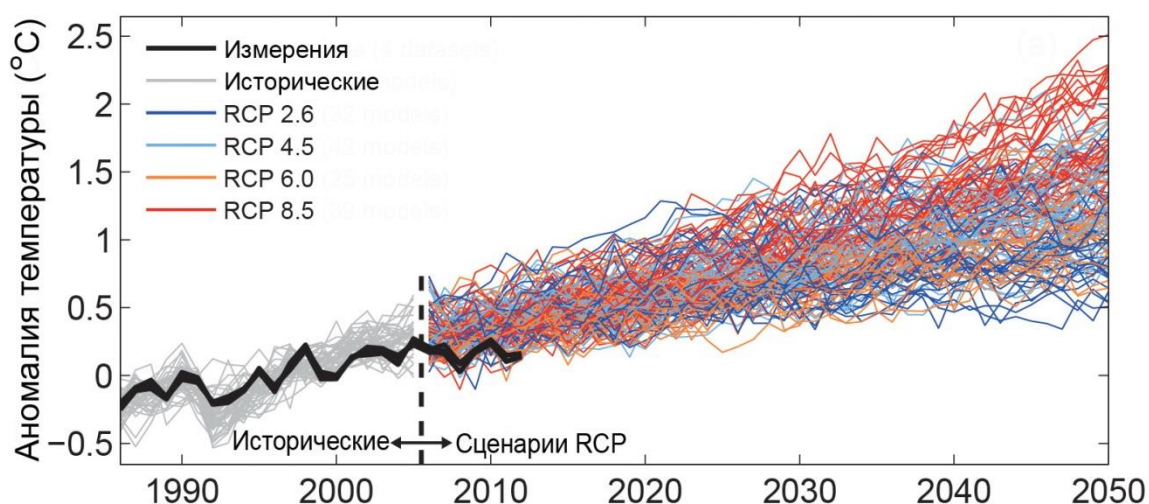


Рис. 34. Изменения глобальной средней температуры (°C) у земной поверхности в соответствии с четырьмя сценариями RCP относительно среднего значения за период 1986—2005 гг. [5].

Значения до 2005 г. соответствуют данным измерений, после 2005 г. — модельным расчётам; каждая цветная линия соответствует результатам, полученным с помощью одной из трёх-четырёх десятков климатических моделей.

Однако показанный на рис. 34 отклик температуры в приземном воздухе получен в условиях эволюции всех парниковых газов, а не одного лишь метана. Несомненно, для политических и практических целей гораздо важнее именно комплексная оценка, нам же интересно выделить, насколько температура

«обязана» своим ростом именно CH_4 . Для этого обратимся к исследованиям, проведённым группой экспертов при Арктическом совете^{***}. Арктика, подвергшаяся чрезвычайно высокому, по сравнению с глобальным, потеплению, вызывает особый интерес. Не последнее место среди причин такого положения дел занимает рост содержания метана в атмосфере. По итогам этих исследований был опубликован отчёт со всесторонним анализом состояния «метаносферы» северной полярной области. В нём среди прочих была сделана попытка выделить индивидуальный вклад метана в изменение приземной температуры в период 1850—2005 гг. (см. рис. 35).

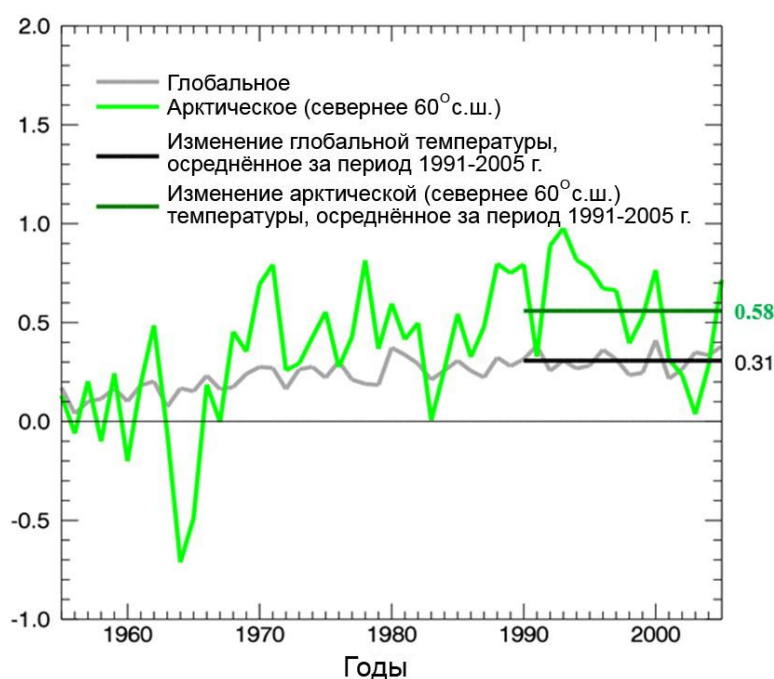


Рис. 35. Изменение средней глобальной и среднеарктической температуры в приземном воздухе ($^{\circ}\text{C}$), обусловленное ростом концентрации метана, начиная с 1850 г., согласно расчёту канадской модели земной системы [71].

Здесь изменение температуры в приземном воздухе вычислено как разность двух модельных вариантов расчёта. Во втором из них учтена полная эволюция всего газового состава атмосферы с 1850 до 2005 г. (в том числе концентрация CH_4 за этот период увеличилась с 791 до 1754 млрд⁻¹), а в первом эволюционировали все компоненты атмосферного воздуха,

^{***} Арктический совет — международная организация, представляющая восемь арктических государств (Канада, Дания, Финляндия, Исландия, Норвегия, Россия, Швеция и США) и Европейский парламент, создана в 1996 году для защиты уникальной природы северной полярной зоны.

за исключением метана, концентрация которого всё время соответствовала уровню 1850 года и считалась постоянной, равной 791 млрд⁻¹. Результат вычитания приземных температур, вычисленных «с метаном» и «без метана», даёт некоторое представление о лепте, вносимой CH₄ в глобальное потепление. Расчёты показали, что отклик приземной температуры на рост содержания атмосферного метана в Арктике значительно превосходит её отклик в глобальном масштабе. В частности, увеличение средней за период 1991—2005 гг. приземной температуры в Арктике составило 0,58 против глобальных 0,31 °C.

Вопросы, занимавшие экспертов при Арктическом совете, касались как теоретических (будущие изменения арктического климата), так и практических (какие меры целесообразно предпринять и что можно от них ожидать) аспектов эволюции глобальной и арктической «метаносферы». Для достижения этих целей были рассмотрены три сценария антропогенной эмиссии CH₄ в ближайшие десятилетия: CLE (Current Legislation), MFR (Maximum technically Feasible Reduction) и MFR AC8. Сценарий CLE, как следует из расшифровки аббревиатуры, предполагает следование требованиям текущих законодательств всех стран. Сценарий MFR соответствует ситуации, когда все страны осуществляют меры для максимально возможного сокращения выбросов метана. Наконец, в рамках сценария MFR AC8 считается, что меры для максимально возможного сокращения выбросов метана предпринимают только восемь арктических стран (см. сноску выше), в то время как остальные ведут себя согласно сценарию CLE (см. рис. 36).

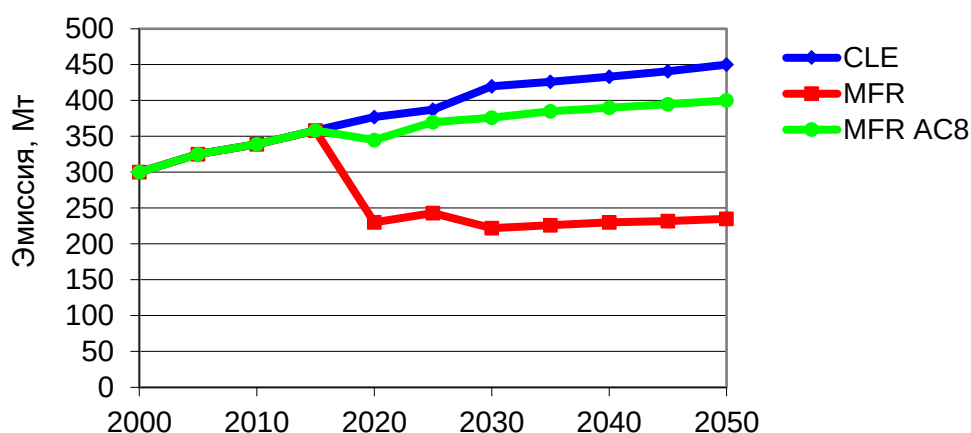


Рис. 36. Антропогенная эмиссия метана (Мт/год) в соответствии с тремя сценариями антропогенных выбросов [71].

Во всех сценариях считается, что в период 2030—2050 гг. антропогенная эмиссия метана будет возрастать, но при оптимистичном развитии событий в сценарии MFR этому росту будет предшествовать её значительное уменьшение к 2020 г. Как это отразится на содержании CH_4 , демонстрирует рисунок 37.

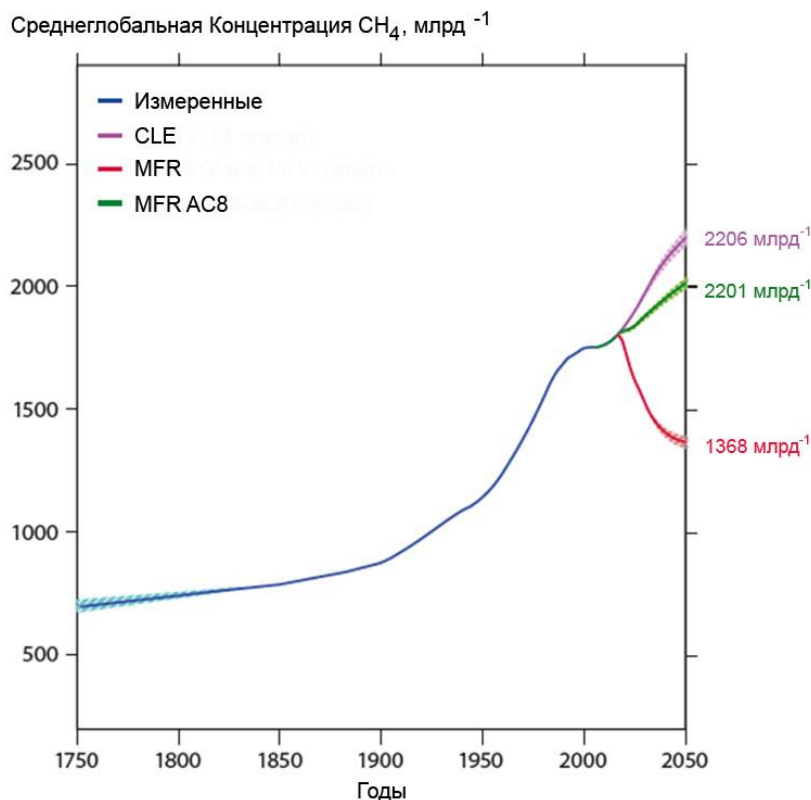


Рис. 37. Эволюция среднеглобальной концентрации метана в соответствии с тремя сценариями антропогенных выбросов [71].

Как показывает рис. 37, концентрация CH_4 будет возрастать не только при отсутствии ограничительных акций по сокращению выбросов метана, но и в случае, если такие акции будут предприняты лишь группой арктических стран. Сокращения содержания метана в атмосфере, более чем в полтора раза к 2050 году, можно ожидать лишь при активном участии всего мирового сообщества (по сценарию MFR). Представленные на рис. 37 концентрации вычислены в предположении отсутствия роста естественного источника CH_4 , что едва ли соответствует действительности (вспомним, например, о значительном вкладе переувлажнённых территорий). В ситуации, когда погрешности в оценках интенсивности естественного источника метана велики, был рассчитан ряд вариантов с фиксированной скоростью роста его выбросов (см. рис. 38).

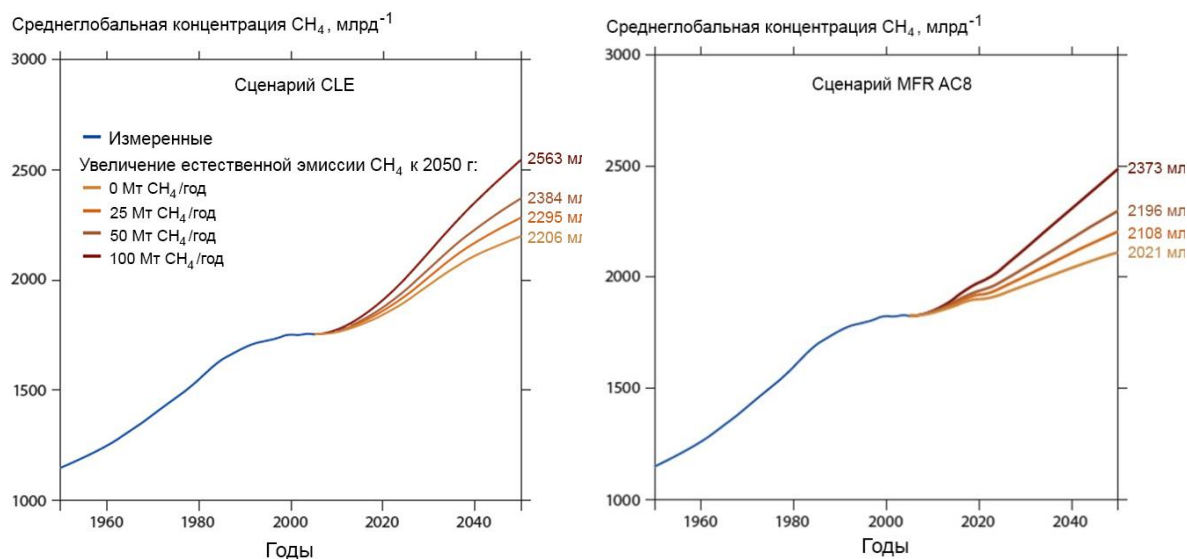


Рис. 38. Модельная оценка среднеглобальной концентрации метана (млрд⁻¹) при предположении различных темпов роста естественного источника CH₄ для сценариев CLE (слева) и MFR AC8 (справа) [71].

Очевидно, чем больше предполагаемый выброс, тем выше концентрация CH₄: при «добавке» в 25 Мт/год увеличение концентрации метана к 2050 г. в обоих сценариях составит примерно 4 %, а при «добавке» в 100 Мт/год — 16—17 %. Рисунок 38 является хорошей «теоретической» иллюстрацией чувствительности содержания метана в атмосфере к размеру его ежегодных выбросов, поскольку вряд ли «добавки» в 100 или 50 Мт/год будут иметь место (напомним, что суммарная современная эмиссия метана из естественных источников оценивается в 231 Мт/год, см. табл. 2).

Памятуя о том, что оценка поведения эмиссии, а с ней и содержания метана в атмосфере в ближайшие десятилетия, не является самоцелью, экспертам Арктического совета, а вместе с ними и нам с Вами, впору задаться вопросом о том, как должны отразиться на температуре воздуха в приземном слое (а в широком смысле и на климате) гипотетические меры, реализация которых заложена в сценарии MFR. Ответ на этот вопрос даёт рисунок 39. На нём показано, как изменится среднезональная температура поверхностного слоя воздуха, случись коллективное максимально возможное сокращение антропогенных выбросов метана. С этой целью была вычислена разность температур, рассчитанных в сценариях MFR и CLE. Согласно результатам модельных расчётов, эффект от комплекса мер, направленных на уменьшение эмиссии CH₄, составит около 0,2 °С в тропической зоне, и будет усиливаться

в Арктике по мере приближения к Северному полюсу, где достигнет примерно 0,6 °C.

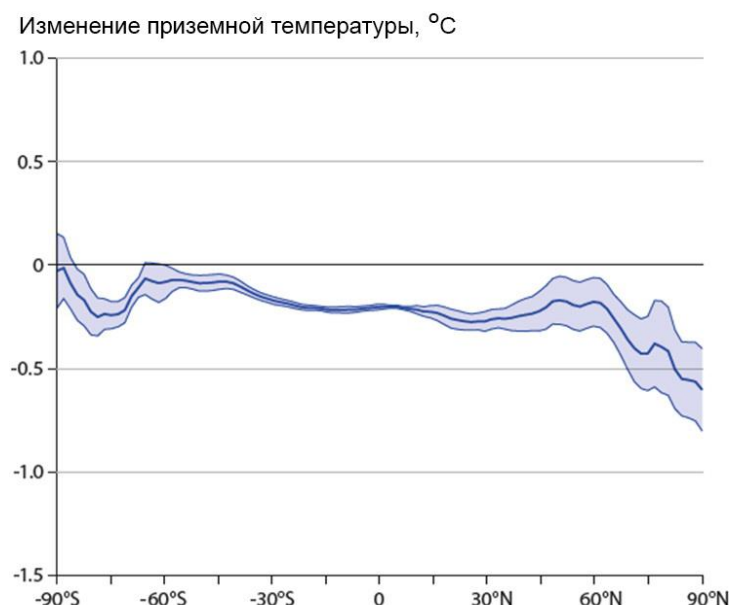


Рис. 39. Изменение среднезональной температуры приповерхностного слоя воздуха, обусловленное максимально технически возможным сокращением антропогенной эмиссии метана (MFR минус CLE) — средняя кривая, две крайние кривые соответствуют стандартному отклонению [71].

К сожалению, сегодня не видно предпосылок к тому, чтобы все страны приложили усилия (тем более — максимально возможные!) для сокращения эмиссии метана в атмосферу. Поэтому в ближайшие десятилетия куда более правдоподобным (очень хотелось бы ошибиться) выглядит продолжение интенсивного загрязнения атмосферы парниковыми газами, а с ним и роста температуры в приземном слое воздуха.

Заключение

Мы видели свою задачу в рассказе о том, что известно о метане и какова его роль в современных изменениях климата. При этом наше повествование касалось лишь основных фактов и результатов их анализа, позволяющих нарисовать общую картину сегодняшнего состояния дел и осторожно заглянуть в ближайшее будущее. Можно сказать, что эта картина написана крупными мазками, при этом многие мелкие штрихи-детали выпали из поля нашего внимания. Такие штрихи вряд ли могли бы значительно расширить Ваш кругозор, но их описание вынудило бы нас с Вами погрузиться в разбор нюансов, отвлекаясь от основной канвы изложения. Если же кто-то

из читателей всё же почувствует себя обделённым, он может углубиться в метановую проблему и восполнить возникшие пробелы, обратившись к списку цитируемой нами литературы. Мы же, повторимся, старались добиться, чтобы нарисованная картина имела завершённый вид и давала достаточно полное представление об одном из основных атмосферных парниковых газов. В какой степени это удалось, судить Вам, уважаемый терпеливый читатель!

Нелишне отметить, что, говоря о завершённом виде нарисованной нами картины, мы имеем в виду её современное, сиюминутное, состояние, которое будет изменяться с течением времени вследствие расширения базы данных измерений, уточнения характеристик источников и стоков метана и оценок его вклада в эволюцию климата Земли. Поэтому, если провести параллель с марафонской дистанцией, исследования метана сегодня находятся, пожалуй, недалеко от стартовой позиции и до финиша им предстоит проделать долгий и, очевидно, нелёгкий путь. И движение по этой дистанции будет проходить в условиях повышенного внимания не только специалистов, но и, надеемся, СМИ, поскольку метан, в силу его антропогенного происхождения (в значительной степени) и относительно недолгого пребывания в атмосфере, в ряду парниковых газов является «слабым звеном» и, как следствие, был выбран главной мишенью в борьбе с нежелательными изменениями климата — в первую очередь, с глобальным потеплением.

Удастся ли в ближайшие десятилетия добиться ощутимого сокращения содержания метана в атмосфере в результате реализации международных (например, того же Парижского соглашения по климату) или односторонних, национальных, акций, честно говоря, неочевидно. Однако не вызывает сомнения, что соответствующие усилия являются жизненно необходимыми и потому обязательно должны быть предприняты. Это касается всех крупных эмитентов метана, включая Россию*.

Такие усилия, конечно, являются, весьма затратными, и потому неизбежно найдутся оппоненты, ставящие под сомнение целесообразность их реализации. Так уже было в недавнем прошлом, когда обсуждались и внедрялись меры, направленные на защиту озонового слоя нашей планеты.

* Конечно, может показаться, что примерно семипроцентный вклад нашей страны в глобальную эмиссию метана отнюдь не самый большой. Однако и не пренебрежимый: согласились бы Вы, к примеру, поучаствовать в лотерее с крупными призами, если вероятность выигрыша составляла 7 % (несравненно выше существующей в реалиях)? Скорее всего, ответ на этот умоизнурительный вопрос окажется положительным.

Но внимательный читатель мог заметить, что «озоновая» полемика в последнее время осталась лишь на страницах специальных изданий и практически сошла на нет в СМИ «широкого профиля». Это ли не свидетельство того, что ситуация с восстановлением озонового слоя медленно, но верно нормализуется? Хочется верить, что спустя некоторое время со всем основанием подобный вывод можно будет сделать и относительно метана.

Метан, как, впрочем, и озон, на протяжении всей нашей жизни незримо оказывает влияние на её качество. Вызванные ростом его содержания в атмосфере изменения климата приближаются к той опасной черте, когда вопрос комфортности может смениться вопросом возможности выживания. Не в наших с Вами интересах столь нежелательный поворот событий. Ещё с древних времён известно: «легко сказать, трудно сделать» (*Facile dictu, difficile factu*). Да, сделать нелегко, но жизненно необходимо!

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%B0%D0%BD>.
2. Бажин Н.М. Метан в атмосфере. <http://www.pereplet.ru/obrazovanie/stsoros/958.html>.
3. Cicerone R.J., Oremland R.S. (1988). Biogeochemical aspects of atmospheric methane. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 2, №. 4, p. 299–327.
4. <http://tehtab.ru/guide/guidephysics/solvability/solvabilityofsomegases/>
5. 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, 1535 p. <http://ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
6. Climate Change: The IPCC Scientific Assessment (1990), Ch. 2. http://www.ipcc.ch/ipccreports/far/wg_l/ipcc_far_wg_l_chapter_02.pdf
7. Кароль И.Л., Киселёв А.А. Парадоксы климата (2013), М., Аст-пресс, 288 с.
8. <http://5geografiya.net/datas/geografija/izmenenie-klimata-na-planete/0022-022-Glavnaja-klimaticheskaja-osobennost.jpg>
9. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmospheric_Transmission.png
10. https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B0%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B5_%D0%B3%D0%B0%D0%B7%D1%8B
11. <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>
12. Fiore A.M., Naik V., Leibensperger E.M. (2015). Air quality and climate connections. *Journal of the Air&Waste Management Association*. v. 65, № 6, pp. 645–685. Doi: 10.1080/10962247.2015.1040526
(http://www.ldeo.columbia.edu/~amfiore/publications/Fiore_Naik_Leibensperger_ClimAQ_CR_AWMA_2015_wSupplInfo.pdf)
13. Etminan M., Myhre G., Highwood E.J., Shine K.P. (2016). Radiative forcing of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide: A significant revision of the methane radiative forcing. *Geophysical Research Letters*, v. 43, p. 12614–12623.
14. <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>
15. Отчет Межправительственной группы Экспертов по Изменениям Климата (МГЭИК), 2007 // http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_ru.pdf
16. Dean J.F., Middelburg J.J., Röckmann T., Aerts R., Blauw L.G., Egger, M., Jetten M.S.M., de Jong A.E.E, Meisel O.H., Rasigraf O., Slomp C.P., in't Zandt M.H., Dolman A.J. (2018). Methane feedbacks to the global climate system in a warmer world. *Reviews of Geophysics*, 56(1), pp. 207–250. DOI: 10.1002/2017RG000559.

17. http://www.meteorf.ru/upload/pdf_download/NIR-2017_v1_fin.pdf
18. https://jpldataeval.jpl.nasa.gov/pdf/JPL_Publication_15-10.pdf
19. Crutzen P.J., Zimmermann P.H. (1991). The changing photochemistry of the troposphere, *Tellus*. 43AB, pp. 136–151.
20. Prather M., Holmes C., Hsu J. (2012). Reactive greenhouse gas scenarios: Systematic exploration of uncertainties and the role of atmospheric chemistry, *Geophysical Research Letters*, v. 39, doi: 10.1029/2012GL051440.
21. Allan W.; Struthers H.; Lowe D.C. (2007). Methane carbon isotope effects caused by atomic chlorine in the marine boundary layer: Global model results compared with Southern Hemisphere measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 112, D4, D04306, doi: 10.1029/2006JD007369.
22. Curry C.L. (2007). Modeling the soil consumption of atmospheric methane at the global scale. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 21, GB4012, doi: 10.1029/2006GB002818.
23. Spahni R., Wania R., Neef L., van Weele M., Pison I., Bousquet P., Frankenberg C., Foster P., Joos F., Prentice I.C., van Velthoven P. (2011) Constraining global methane emissions and uptake by ecosystems. *Biogeosciences*, v. 8, p. 1643–1665.
24. Kirschke S., Bousquet S.P., Ciais P., et al. (2013). Three decades of global methane sources and sinks. *Nature Geoscience*. Published online 22 September 2013. pp. 813–823. doi: 10.1038/ngeo1955. <http://www.nature.com/ngeo/journal/vaop/ncurrent/full/ngeo1955.html>.
25. 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*, v. 13, pp. 2563–2587.
26. Saunio 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., Zhu Q. (2016). The global methane budget 2000–2012. *Earth System Science Data*, 8(2), pp. 697–751. <https://doi.org/10.5194/essd-8-697-2016>.

27. <https://www.esrl.noaa.gov/csd/assessments/ozone/1994/chapters/chapter2.pdf>.
28. Saunio M., Jackson R.B., Bousquet P., Poulter B., Canadell J.G. The growing role of methane in anthropogenic climate change. *Environmental Research Letters*, 2016, v. 11, 5 p. doi:10.1088/1748-9326/11/12/120207.
29. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2017 год. М., 2018, 206 с. <http://downloads.igce.ru/publications/reviews/review2017.pdf>.
30. Седьмое Национальное Сообщение Российской Федерации, представленное в соответствии со статьями 4 и 12 Рамочной Конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата и статьей 7 Киотского протокола. М., 2017, 348 с.
31. McGuire A.D., Christensen T.R., Hayes D., Heroult A., Euskirchen E., Kimball J.S., Koven C., Lafleur P., Miller P.A., Oechel W., Peylin P., Williams M., Yi Y. An assessment of the carbon balance of Arctic tundra: comparisons among observations, process models, and atmospheric inversions. *Biogeosciences*. v. 9, pp. 3185–3204, 2012. doi: 10.5194/bg-9-3185-2012. www.biogeosciences.net/9/3185/2012/.
32. Dolman A.J., Shvidenko A., Schepaschenko D., Ciais P., Tchepakova N., Chen T., van der Molen M.K., Beileli Marchesini L., Maximov T.C., Maksyutov S., Schulze E.-D. An estimate of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory-based, eddy covariance and inversion methods. *Biogeosciences*, 2012, v. 9, pp. 5323–5340.
33. Bohn T.J., Melton J.R., Ito A., Kleinen T., Spahni R., Zhang B., Zhu X., Schroeder R., Glagolev M.V., Maksyutov S., Brovkin V., Chen G., Denisov S.N., Eliseev A.V., Gallego-Salo A., McDonald K.C., Rawlins M.A., Riley W.J., Subin Z.M., Tian H., Zhuang Q., Kaplan J.O. WETCHIMP-WSL: intercomparison of wetland methane emissions models over West Siberia. *Biogeosciences*. v. 12, p. 3321–3349, 2015. doi:10.5194/bg-12-3321-2015.
34. https://www.loveenergysavings.com/media/132523/methane_hydrate.jpg.
35. Матвеева Т.Г., Черкашѐв Г.А. Газогидраты: проблемы изучения и освоения. <http://www.rosnedra.gov.ru/data/Files/File/2569.pdf>.
36. Dickens G.R. Down the rabbit hole: Toward appropriate discussion of methane release from gas hydrate systems during the Paleocene-Eocene thermal maximum and other past hyperthermal events. *Climate of the Past*, v. 7, pp. 831–846, 2011, doi: 10.5194/cp-7-831-2011.
37. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Sergienko V., Salyuk A., Kosmach D., Chernykh D., Stubbs C., Nicolsky D., Tumskoy V., Gustafsson O. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf, *Nature Geoscience*, v. 7, №. 1, 2014, pp. 64–70.
38. Kretschmer K., Biastoch A., Rüpke L., Burwicz E. Modeling the fate of methane hydrates under global warming. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 29 (5), p. 610–625, 2015. <https://doi.org/10.1002/2014GB005011>.

39. http://ruxpert.ru/images/5/53/%D0%9A%D0%B0%D1%80%D1%82%D0%B0_%D0%B2%D0%B5%D1%87%D0%BD%D0%BE%D0%B9_%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B7%D0%B%D0%BE%D1%82%D1%8B.jpg
40. Kohnert K., Serafimovich A., Metzger S., Hartmann J., Sachs T. Strong geologic methane emissions from discontinuous terrestrial permafrost in the Mackenzie Delta, Canada. *Scientific Reports*, 2017, v. 7 (1). doi: 10.1038/s41598-017-05783-2.
41. Shakhova N., Semiletov I. Methane release and coastal environment in the East Siberian Arctic shelf. *Journal of Marine Systems*, v. 66, pp. 227–243, 2007.
42. http://www.arhsc.ru/data/files/2010_03_31/materialy2010/ms10_Sergienko.pdf
43. Schneider J., Grosse G., Wagner D. Land cover classification of tundra environments in the Arctic Lena Delta based on Landsat 7 ETM+ data and its application for upscaling of methane emissions. *Remote Sensing of Environment*, v. 113, 2009, pp. 380–391, 2009. doi:10.1016/j.rse.2008.10.013.
44. Ciais P., Dolman A.J., Bombelli A., Duren R., Peregon A., Rayner, P.J., Miller C., Gobron N., Kinderman G., Marland G., Gruber N., Chevallier F., Andres R.J., Balsamo G., Bopp L., Bréon F.-M., Broquet G., Dargaville R., Battin T.J., Borges A., Bovensmann H., Buchwitz M., Butler J., Canadell J.G., Cook R.B., DeFries R., Engelen R., Gurney K.R., Heinze C., Heimann M., Held A., Henry M., Law B., Luyssaert S., Miller J., Moriyama T., Moulin C., Myneni R.B., Nussli C., Obersteiner M., Ojima D., Pan Y., Paris J.-D., Piao S.L., Poulter B., Plummer S., Quegan S., Raymond P., Reichstein M., Rivier L., Sabine C., Schimel D., Tarasova O., Valentini R., Wang R., van der Werf G., Wickland D., Williams M., Zehner C.: Current systematic carbon-cycle observations and the need for implementing a policy-relevant carbon observing system, *Biogeosciences*, v. 11, p. 3547–3602, <https://doi.org/10.5194/bg-11-3547-2014>, 2014.
45. <http://ifaran.ru/troica/biblio/troica-ru.pdf>
46. Sasakawa M., Shimoyama K., Machida T., Tsuda N., Suto H., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Krasnov O., Saeki T., Koyama Y., Maksyutov S. Continuous measurements of methane from a tower network over Siberia. *Tellus*, 2010, v. 62, Issue 5, p. 403–416.
47. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Иноуе Г. Пространственная и временная изменчивость концентрации CO₂ и CH₄ в приземном слое воздуха на территории Западной Сибири. *Оптика атмосферы и океана*, 2009, т. 22, № 2, с. 183–192.
48. Шахова Н.Е., Семилетов И.П., Салюк А.Н., Бельчева Н.А., Космач Д.А. Аномалии метана в приземном слое атмосферы на шельфе Восточно-Сибирской Арктики. *Доклады АН*, 2007, т. 414, № 6, с. 819–823.
49. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Reikant P., Salyuk A., Kosmach D. Geochemical and geophysical evidence of methane release from the inner East Siberian Shelf. *Journal of Geophysical Research*, 2010, v. 115, doi: 10.1029/2009JC005602.

50. Юрганов Л. Спутники измеряют метан в Арктике. Наука и жизнь, 2016, № 8, с. 2–6.
51. Анисимов О.А., Кокорев В.А. Сравнительный анализ наземных, морских и спутниковых измерений метана в нижней атмосфере российской части Арктики в условиях изменения климата. Исследование Земли из космоса, 2015, № 2, с. 1–14.
52. <http://www.methanelevels.org/>
53. Dlugokencky E.J., Masarie K.A., Lang P.M., Tans P.P. Continuing decline in the growth rate of atmospheric methane, *Nature*, 1998, v. 393, pp. 447–450.
54. 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. Rising atmospheric methane: 2007–2014 growth and isotopic shift. *Global Biogeochemical Cycles*, 2016, v. 30, p. 1356–1370.
55. Schaefer H., Fletcher S.E.M., Veidt C., Lassey K.R., Brailsford G.W., Bromley T.M., Dlugokencky E.J., Michel S.E., Miller J.B., Levin I., Lowe D.C., Martin R.J., Vaughn B.H., White J.W. A 21st-century shift from fossil-fuel to biogenic methane emissions indicated by $^{13}\text{CH}_4$. *Science*, 2016, v. 352 (6281), pp. 80–84. <https://doi.org/10.1126/science.aad2705>.
56. Worden J.R., Bloom A.A., Pandey S., Jiang Z., Worden H.M., Walker T.W., Houweling S., Röckmann T. Reduced biomass burning emissions reconcile conflicting estimates of the post-2006 atmospheric methane budget. *Nature Communications*, 2017, v. 8 (1), 11 p. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02246-0>.
57. Turner A.J., Frankenberg C., Wennberg P.O., Jacob D.J. Ambiguity in the causes for decadal trends in atmospheric methane and hydroxyl. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, v. 114 (21), p. 5367–5372. <https://doi.org/10.1073/pnas.1616020114>.
58. Pison I., Ringeval B., Bousquet P., Prigent C., Papa F. Stable atmospheric methane in the 2000s: Key-role of emissions from natural wetlands. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, v. 13 (23), pp. 11609–11623. <https://doi.org/10.5194/acp-13-11609-2013>.
59. http://www.univ-reims.fr/trombinoscope-pages-personnelles/page_durry/version-anglaise/english-version,9562,17478.html
60. El Khair Z.M., Joly L., Cousin J., Decarpenterie T., Dumelié T., Maamary R., Chauvin R., Durry G. In situ measurements of methane in the troposphere and the stratosphere by the Ultra Light SpEctrometer Amulse. *Applied Physics B: Lasers & Optics*, 2017, 11 p., <https://doi.org/10.1007/s00340-017-6850-4>.
61. Fisher R.E., Sriskantharajah S., Lowry D., Lanoisellé M., Fowler C.M.R., James R.H., Hermansen O., Lund Myhre C., Stohl A., Greinert J., Nisbet-Jones P.B.R., Mienert J., Nisbet

- E.G. Arctic methane sources: Isotopic evidence for atmospheric inputs. *Geophysical Research Letters*, 2011, v. 38, L21803, doi: 10.1029/2011GL049319.
62. https://www.esrl.noaa.gov/gmd/webdata/ccgg/trends/ch4_trend_gl.pdf
63. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8f/AIRS_Methane.png
64. <http://www.typhoon.obninsk.ru/activities/climate-monitoring/LAST/dbLAST.php>
65. Давыдов Д.К., Белан Б.Д., Антохин П.Н., Антохина О.Ю., Антонович В.В., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Ахлестин А.Ю., Белан С.Б., Дудорова Н.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева Т.К., Толмачёв Г.Н., Фазлиев А.З., Фофонов А.В. (2018). Мониторинг атмосферных параметров: 25 лет TOR-станции ИОА СО РАН. *Оптика атмосферы и океана*, т. 31, № 10, с. 845–853.
66. Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Y., Belan B.D., Belan S.B., Davydov D.K., Ivlev G.A., Fofonov A.V., Kozlov A.V., Paris J.-D., Nedelec P., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N. Distribution of trace gases and aerosols in the troposphere over Siberia during wildfires of summer 2012. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, v. 123, 13 p.
67. Naik V., Voulgarakis A., Fiore A.M., Horowitz L.W., Lamarque J.-F., Lin M., Prather M.J., Young P.J., Bergmann D., Cameron-Smith P.J., Cionni I., Collins W.J., Dalsøren S.B., Doherty R., Eyring V., Faluvegi G., Folberth G.A., Josse B., Lee Y.H., MacKenzie I.A., Nagashima T., van Noije T.P.C., Plummer D.A., Righi M., Rumbold S.T., Skeie R., Shindell D.T., Stevenson D.S., Strode S., Sudo K., Szopa S., Zeng G. Preindustrial to present-day changes in tropospheric hydroxyl radical and methane lifetime from the Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP), *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 13, p. 5277–5298, <https://doi.org/10.5194/acp-13-5277-2013>, 2013.
68. https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-05/documents/summary_global_nonco2_projections_dec2012.pdf
69. Kiselev A.A., Karol I.L. Modeling of the long term tropospheric trends of hydroxyl radical for the Northern Hemisphere. *Atmospheric Environment*, 2000, v. 34, № 29–30, p. 5271–5282.
70. Anthony K.W., Schneider von Deimling T., Nitze I., Frohling S., Emond A., Daanen R., Anthony P., Lindgren P., Jones B., Grosse G. (2018). 21st-century modeled permafrost carbon emissions accelerated by abrupt thaw beneath lakes. *Nature Communications*, v. 9, 11 p. doi: 10.1038/s41467-018-05738-9. www.nature.com/naturecommunications.
71. AMAP Assessment 2015: Methane as an Arctic climate forcer, Oslo, 2015, 139 p.

А. А. Киселёв, И. Л. Кароль

С МЕТАНОМ ПО ЖИЗНИ

ISBN 978-5-9500883-7-7



Подписано в печать 18.07.2019.

Формат 60×84 ¹/₈. Гарнитура Times New Roman. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,48. Тираж 300 экз. Заказ № 2261-19/18079.

Отпечатано в соответствии с предоставленными материалами
в ООО «Амит»», 410004, г. Саратов, ул. Чернышевского, 88.

Тел.: 8-800-700-86-33 | (845-2) 24-86-33

E-mail: zakaz@amirit.ru

Сайт: amirit.ru