

## АТТРИБУЦИЯ ИЗМЕНЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В АТМОСФЕРЕ

*С.М. Семенов*<sup>1), 2)</sup>

<sup>1)</sup> Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН,  
Россия, 107258, г. Москва, ул. Глебовская 20Б; *SergeySemenov1@yandex.ru*

<sup>2)</sup> Институт географии РАН,  
Россия, 109017, г. Москва, Старомонетный пер. 29

**Резюме.** Корректная оценка вклада различных источников выбросов парникового газа в его общее содержание в атмосфере требует развития теории атрибуции. Одним из возможных путей может быть следующее использование метода «виртуальной метки»: в момент выброса порция вещества мысленно снабжается меткой, обозначающей ее происхождение от конкретного источника, и при дальнейших переходах между компонентами климатической системы в модельных расчетах эта метка сохраняется. Использование этого метода для оценки антропогенной фракции общего содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере за 1851 – 1999 гг. дало реалистичные оценки. Однако расчетное значение оказалось все-таки несколько меньше фактического увеличения содержания CO<sub>2</sub>. В работе объясняется этот эффект. Дальнейшее развитие теории атрибуции необходимо для научно-обоснованного осуществления современных международных усилий по ограничению роста содержания парниковых газов в атмосфере.

**Ключевые слова.** Парниковые газы, антропогенная фракция, модельная оценка, метод виртуальной метки.

## ATTRIBUTION OF CHANGES IN THE GREENHOUSE GASES' CONTENT IN THE ATMOSPHERE

*S. M. Semenov*<sup>1), 2)</sup>

<sup>1)</sup> Institute of Global Climate and Ecology, Roshydromet and RAS,  
20B, Glebovskaya str., 107258 Moscow, RUSSIA; *SergeySemenov1@yandex.ru*

<sup>2)</sup> Institute of Geography, Russian Academy of Sciences  
29, Staromonetny, 109017, Moscow, Russia

**Summary.** Correct evaluation of contributions of different sources of a greenhouse gas emission to its overall content in the atmosphere requires development of the attribution theory. One of possible solutions could be the following use of the “virtual label” method. At the moment of release, a portion of the substance is supplied mentally with a label indicating the particular emission source as its origin.

The label remains unchanged in further transitions between components of the climate system in model calculations. The use of this approach for the estimation of anthropogenic fraction of the overall CO<sub>2</sub> content in the atmosphere in 1851 – 1999 yielded realistic values. However, the calculated value occurred somewhat less than the actual increase in CO<sub>2</sub> content. The effect is explained in the paper. Further development of the attribution theory is needed for scientifically based implementation of current international agreements aiming at restraining the increase of greenhouse gases' content in the atmosphere.

**Keywords.** Greenhouse gases, anthropogenic fraction, model estimation, virtual label method.

## Введение

Развитие мирового хозяйства привело к тому, что современный состав атмосферы оказался заметно измененным по отношению к доиндустриальному<sup>1)</sup> состоянию. Это справедливо, в том числе, в отношении парниковых газов (ПГ) – углекислого газа CO<sub>2</sub>, метана CH<sub>4</sub>, закиси азота N<sub>2</sub>O и ряда других. Обогащение атмосферы этими веществами вследствие выбросов в атмосферу в ходе хозяйственной деятельности стало особенно заметным с середины XX века. Это привело к антропогенному усилению парникового эффекта на Земле.

Для предотвращения возможных негативных последствий этого явления мировым сообществом было разработано и в 1992 г. принято специальное международное соглашение – Рамочная Конвенция ООН об изменении климата (РКИК ООН). Оно направлено на сдерживание антропогенных выбросов парниковых газов в атмосферу и стабилизацию их содержания в атмосфере на допустимом уровне. Напомним, что целью РКИК, сформулированной в ее статье 2, является стабилизация концентраций парниковых газов в атмосфере на уровне, который не приводит к опасному антропогенному вмешательству в климатическую систему («stabilization of greenhouse gas concentrations in the atmosphere at a level that would prevent dangerous anthropogenic interference with the climate system»). В настоящее время предельно допустимым увеличением средней глобальной температуры в приповерхностном слое по отношению к доиндустриальному уровню считается 2 °С. Принятие этой «глобальной цели» - результат политического консенсуса сторон РКИК, достигнутого при принятии Парижского соглашения в 2015 г. К настоящему времени доиндустриальный уровень уже превышен примерно на 0.8 °С.

При обсуждении, разработке и принятии протоколов к РКИК ООН – Киотского протокола (1997 г.) и Парижского соглашения (2015 г.) – часто и на разных уровнях, научном и политическом, возникал вопрос об ответственности разных стран за прирост концентраций парниковых газов в атмосфере, главным образом – углекислого газа. Обычно при этом говорится об общей, но дифференцированной ответственности стран, но конкретных объектив-

---

<sup>1)</sup> Условное начало индустриальной эры – 1750 г.

ных способов оценивать такую меру ответственности не предлагается. Для этого необходимо развитие теории *атрибуции*.

Последним термином обозначается процедура разложения наблюдаемого изменения на составляющие, обусловленные разными факторами. В нашем случае эти факторы – различные источники парниковых газов или их химических предшественников (например, страны), а также естественные факторы изменчивости содержания парниковых газов в атмосфере.

В Глоссарии Пятого оценочного доклада (IPCC, 2013) Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) приведены следующие базовые определения <sup>2)</sup>:

**Выявление (detection) и атрибуция (attribution):** Выявление изменения определяется как процесс демонстрации того, что климат или система, на которую воздействует климат, изменилась в определенном статистическом смысле, но без указания причины изменения. Обнаруженное изменение считается выявленным по данным наблюдений, если вероятность его случайного появления вследствие лишь внутренней изменчивости оказывается малой, например < 10 %. **Атрибуция (attribution) определяется как процесс оценки относительных вкладов множества причинных факторов в изменение или событие** с указанием статистической значимости (Hegerl et al., 2010).

Заметим, что понятие «*выявление*» применимо лишь к произошедшим изменениям, поскольку процедура основывается на данных наблюдений. А понятие «*атрибуция*» вполне применимо и к будущим изменениям. При расчетной оценке таких изменений вполне корректным является вопрос об их атрибуции.

К сожалению, существующая в настоящее время в РКИК понятийная база не позволяет в полной мере решить проблему атрибуции изменений содержания парниковых газов в атмосфере с научных позиций. Статья 1 Рамочной Конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН) содержит определения основных понятий, которые используются в формулировках статей РКИК ООН. В том числе, в пп. 7 – 9 приводятся определения понятий «накопитель», «поглотитель» и «источник»:

7. «Накопитель» означает компонент или компоненты климатической системы, в которых происходит накопление парникового газа или прекурсора <sup>3)</sup> парникового газа;

8. «Поглотитель» означает любой процесс, вид деятельности или механизм, который поглощает парниковый газ, аэрозоль или прекурсор парникового газа из атмосферы;

---

<sup>2)</sup>Оригинал: **Detection and attribution:** Detection of change is defined as the process of demonstrating that climate or a system affected by climate has changed in some defined statistical sense, without providing a reason for that change. An identified change is detected in observations if its likelihood of occurrence by chance due to internal variability alone is determined to be small, for example, <10 %. Attribution is defined as the process of evaluating the relative contributions of multiple causal factors to a change or event with an assignment of statistical confidence (Hegerl et al., 2010).

<sup>3)</sup>Транслитерация английского слова «precursor», т. е. «предшественник».

9. «Источник» означает любой процесс или вид деятельности, в результате которого в атмосферу поступают парниковый газ, аэрозоль или прекурсор парникового газа.

Накопители, поглотители и источники парниковых газов или их прекурсоров (далее, для краткости, это уточнение о прекурсорах будет опускаться) могут быть естественными и антропогенными. При этом антропогенные можно более детально характеризовать принадлежностью к различным странам, их административно-территориальным единицам и конкретным собственникам. Естественные также можно при необходимости детализировать.

Содержание парниковых газов в атмосфере меняется вследствие их выбросов в атмосферу – естественных и антропогенных – и перехода в иные накопители – океан, наземные системы, целевые накопители<sup>4)</sup>, а также поступления из этих накопителей (резервуаров). Общее содержание парниковых газов в атмосфере, его изменение во времени вообще говоря нельзя исследовать с помощью однорезервуарной атмосферной математической модели. Ведь атмосфера – лишь один из компонентов климатической системы Земли, которая состоит из атмосферы, гидросферы (включая криосферу), биосферы, педосферы (почвогрунты). Между этими компонентами происходит обмен веществом и энергией. Уровни содержания веществ (в том числе, углерода, входящего в состав парниковых газов) в компонентах климатической системы, определяются их выбросами – естественными и антропогенными, этим процессом массообмена и выведением за пределы климатической системы. Для исследования этих процессов используются математические модели глобальных биогеохимических циклов.

Для анализа изменения в атмосфере не общего содержания парникового газа, а лишь фракции определенного «происхождения» (например, антропогенной фракции) также нужно использовать математические модели глобальных биогеохимических циклов. Ведь физические и химические законы не различают «происхождение» вещества. Но только этих законов недостаточно. Их нужно дополнить правилами, определяющими изменение «происхождения» вещества в ходе циркуляции между атмосферой, океаном и наземными системами в зависимости от типа источника, поглотителя и накопителя. Для пояснения возникающих проблем приведем простейший пример.

Будем считать, что до начала индустриальной эры, условно – до 1750 г., весь углекислый газ был естественного происхождения. В соответствии с законами своего биогеохимического цикла он циркулировал между атмосферой, океаном и наземными системами. Снабдим мысленно каждый атом углерода, принимавший участие в этом круговороте, белой меткой в знак того, что это вещество естественного происхождения, из естественного источника (освободилось из «непарникового» состояния и начало циркулировать в силу естественного процесса). Те же атомы углерода, которые будут

---

<sup>4)</sup> Некоторые из разрабатываемых в настоящее время методов и технологий инженерии климата предполагают активное изъятие CO<sub>2</sub> из атмосферы и консервацию изъятых атомов углерода.

освобождаться (с 1750 г.) из «непарникового» состояния, переходя в состав  $\text{CO}_2$ , за счет сжигания ископаемого органического топлива, факельного сжигания газа, производства цемента мы будем мысленно снабжать красной меткой. Атомы углерода, освобождающиеся из непарникового состояния и переходящие в состав  $\text{CO}_2$  за счет иных хозяйственных процессов (например, в сельском и лесном хозяйствах) будем снабжать зеленой меткой. При дальнейшем анализе *в модели* можно следить по отдельности за циркуляцией вещества определенного происхождения, определенного «цвета». Этот прием – *метод виртуальной метки* – был впервые нами предложен в статье (Семенов, 1996) и далее развит в работе (Семенов, Кунина, Кухта, 1999). Он аналогичен известному экспериментальному методу использования метки, например, изотопной. Однако у нас речь идет о *мысленной* метке, которая помогает отслеживать перемещения вещества определенного происхождения не в природе, а в модели, при расчетах.

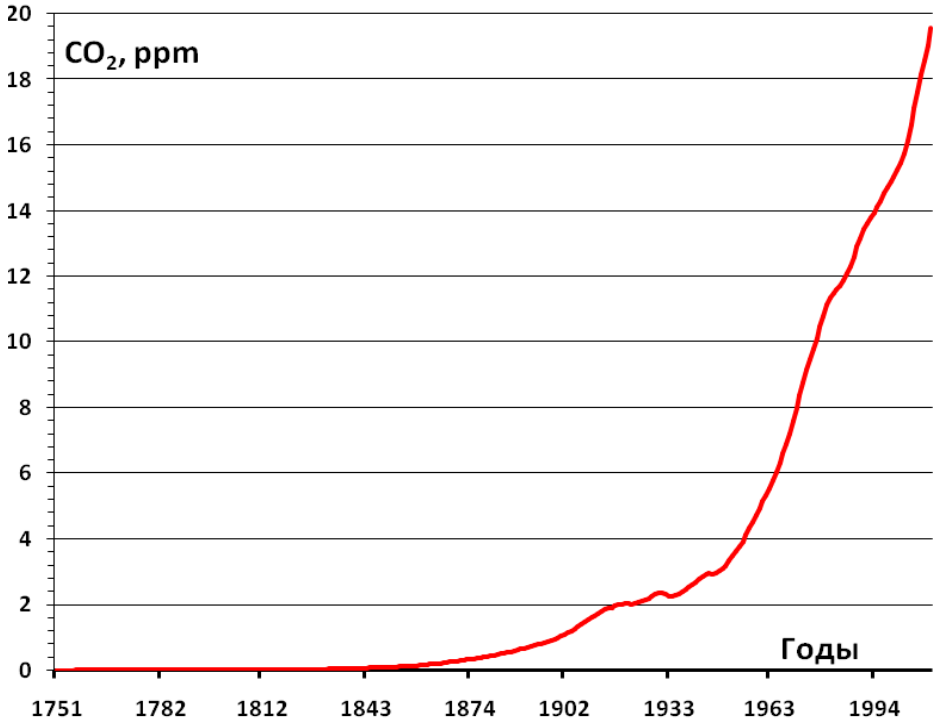
«Красные» атомы углерода в составе молекул  $\text{CO}_2$  пребывают в атмосфере ограниченное время. Они поглощаются Мировым океаном или же наземной биосферой. Оба поглотителя – оба процесса поглощения – естественные: растворение углекислого газа в океане и поступление в наземную биосферу за счет фотосинтеза. Возникает вопрос: следует ли в момент поглощения изменить метку атома с красной на белую? Т. е. «забыть» происхождение этого атома от антропогенного источника? И считать, в частности, что при дальнейшей эмиссии из океана в атмосферу они будут «белыми», естественного происхождения, поскольку они поступают в атмосферу в этом случае из естественных накопителей – океана, наземных систем – в силу естественных процессов – выделения океаном, дыхания биологических организмов и декомпозиции мертвого органического вещества в наземных системах?

Если ответить на этот вопрос положительно, то мы сильно недосчитаемся антропогенного  $\text{CO}_2$  в атмосфере в настоящее время. Атмосфера – резервуар  $\text{CO}_2$ , в котором его время перехода  $\tau$  на земную поверхность (в океан или в наземную биосферу) – примерно 5 лет. Эта оценка получена с учетом данных МГЭИК (IPCC, 2000): в последнее десятилетие XX века содержание углекислого газа в атмосфере было 760 Гт (С), а потоки в океан и в наземные системы – 90 и 60 Гт (С) год<sup>-1</sup> соответственно. Времена выведения  $\text{CO}_2$  из атмосферы в океан ( $\tau_{\text{ao}}$ ) и в наземные системы ( $\tau_{\text{ан}}$ ) можно оценить следующим образом:  $\tau_{\text{ao}} = 760/90$  лет,  $\tau_{\text{ан}} = 760/60$  лет. Обобщенное время выведения на земную поверхность есть  $\tau = (1/\tau_{\text{ao}} + 1/\tau_{\text{ан}})^{-1} = 5.1$  года.

Для расчета изменения во времени содержания  $y(t)$  антропогенного, «красного» углерода в составе  $\text{CO}_2$  используем линейную однорезервуарную модель:

$$dy(t)/dt = f_0(t) - y(t)/\tau,$$

где  $f_0(t)$  – глобальный антропогенный индустриальный выброс  $\text{CO}_2$  от сжигания ископаемого органического топлива, факельного сжигания газа, а также производства цемента. Такие данные за 1751 – 2011 гг. можно найти на сайте [http://cdiac.ornl.gov/ftp/ndp030/global.1751\\_2011.ems](http://cdiac.ornl.gov/ftp/ndp030/global.1751_2011.ems) (Boden, Marland, Andres, 2016). Результаты расчета приведены на рис 1.



**Рисунок 1.** Расчетное изменение содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере (ppm) в 1751-2011 гг., поступившего в атмосферу за счет процессов сжигания ископаемого органического топлива, факельного сжигания газа, а также производства цемента.

Общее содержание CO<sub>2</sub> в атмосфере в доиндустриальное время –примерно 280 ppm, сегодняшнее 400 ppm. При этом считается, что весь прирост – 120 ppm - антропогенный. А расчет в предположении о «забвении» (см. выше) дает лишь около 20 ppm индустриального CO<sub>2</sub> в атмосфере в настоящее время, что гораздо меньше 120 ppm. В последней цифре, конечно, есть и вклад от землепользования и изменения в землепользовании, но он существенно меньше индустриального и противоречия не снимает<sup>5)</sup>.

Если же ответить на поставленный вопрос отрицательно, то возникает необходимость в разработке и принятии сторонами РКИК ООН определенных правил в отношении того, как меняется «происхождение» вещества в процессе циркуляции между атмосферой, океаном и биосферой, которая (циркуляция) осуществляется с участием накопителей, поглотителей и

<sup>5)</sup> Если при оценке потока CO<sub>2</sub> из атмосферы в наземные системы использовать не 60 Гт (С) год<sup>-1</sup> (что соответствует нетто-продукции наземных растений), а 120 Гт (С) год<sup>-1</sup> (что соответствует брутто-продукции (Land Use, Land-use Change, and Forestry, 2000)), то несовпадение станет еще более выражено.

источников также различного происхождения – естественных и антропогенных. При этом антропогенные могут быть различной, более детализированной, «принадлежности».

Цель данной работы – начать разработку теории атрибуции, в том числе очертить возникающие проблемы. Предполагается:

- предложить принцип расчета распределения изменения содержания парниковых газов в атмосфере по источникам эмиссии, основанный на сохранении «происхождения» от источников эмиссии при переходах между компонентами климатической системы;

- провести расчет содержания  $\text{CO}_2$ , поступившего в индустриальное эре в атмосферу за счет процессов сжигания ископаемого органического топлива, факельного сжигания газа, производства цемента, а также землепользования и изменения в землепользовании;

- указать на некоторые остающиеся проблемы, требующие дальнейшего развития теории атрибуции.

## Метод

Рассмотрим систему из  $N$  «резервуаров» («ящиков»)  $1, 2, \dots, N$ . В них, среди прочих, находится определенное вещество, и это вещество может переходить из одного резервуара в другой. Оно может также поступать извне этой системы, и туда же убывать. Эту внешнюю среду будем формально считать резервуаром с номером  $0$ .

Потоки данного вещества удовлетворяют закону сохранения массы: для любого отрезка времени нетто-поглощение (приток минус отток) этого вещества в каждом резервуаре равно изменению его содержания в этом резервуаре.

Обозначим через  $X_1, X_2, \dots, X_N$  мгновенное содержание рассматриваемого вещества в резервуарах  $1, 2, \dots, N$  соответственно, а через  $F_{ij}$  его брутто-поток из резервуара  $i$  в резервуар  $j$ . Здесь  $i$  и  $j$  могут принимать значения  $0, 1, 2, \dots, N$ , но одновременно не могут принимать одинаковые значения, т.е.  $i \neq j$  (потоки вещества внутри резервуаров не рассматриваются).

Закон сохранения массы в данном случае приводит к следующим соотношениям для  $i = 1, 2, \dots, N$ :

$$\frac{dX_i}{dt} = F_{0i} + \sum_{j=1, j \neq i}^N F_{ji} - \sum_{j=1, j \neq i}^N F_{ij} - F_{i0}, \quad (1)$$

Здесь значения всех переменных  $X$  и  $F$  – текущие, отнесены к текущему моменту времени  $t$ . В силу природы моделируемого процесса значения этих переменных неотрицательные (масса не отрицательна). Соотношения (1) обычно называются балансовыми уравнениями.

Введем следующие обозначения:  $\frac{F_{ij}}{X_i} = \frac{1}{\tau_{ij}}$  для  $i = 1, 2, \dots, N; j = 0, 1, 2, \dots, N$ . Физический смысл  $\tau_{ij}$  – время жизни рассматриваемого вещества в резервуаре  $i$

относительно процесса его выведения в резервуар  $j$ . Эта характеристика в общем случае зависит от времени (т.е. отнесена к определенному моменту времени  $t$ ) и имеет смысл для тех моментов времени, когда  $X_i > 0$ . Преобразуем уравнения (1) с учетом принятых обозначений:

$$\frac{dX_i}{dt} = F_{0i} + \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{1}{\tau_{ji}} X_j - \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{1}{\tau_{ij}} X_i - \frac{1}{\tau_{i0}} X_i. \quad (2)$$

Заметим, что система уравнений (2) имеет совершенно такой же вид, что и обычная линейная система балансовых уравнений. Только  $\tau$  могут быть не постоянны, специфичны для различных моментов времени.

Теперь предположим, что общая масса рассматриваемого вещества состоит из нескольких «фракций» различного происхождения. Происхождение определяется тем процессом (процессами), вследствие которого (которых) порции вещества попадали в систему резервуаров 1, 2, ...,  $N$ . Обозначим через  $y_1, y_2, \dots, y_N$  массу вещества определенной фракции в некоторый момент времени  $t$  в резервуарах 1, 2, ...,  $N$  соответственно. Будем считать, что поступление порций вещества данной фракции может происходить следующими двумя путями:

- извне системы, причем соответствующие брутто-потоки  $f_{0i}$  являются частью  $F_{0i}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ ;

- в результате перераспределения вещества между резервуарами, причем соответствующие брутто-потоки  $f_{ij}$  являются частью  $F_{ij}$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, N$ ; в ходе такого процесса поток  $f_{ji}(1 - y_j/X_j)$  описывает «рождение» в резервуаре  $i$  порций вещества данного происхождения за счет переноса из резервуара  $j$  порций веществ любого другого происхождения.

В этих предположениях переменные  $y_1, y_2, \dots, y_N$  будут удовлетворять следующей системе уравнений:

$$\frac{dy_i}{dt} = f_{0i} + \sum_{j=1, j \neq i}^N f_{ji} \left(1 - \frac{y_j}{X_j}\right) + \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{1}{\tau_{ji}} y_j - \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{1}{\tau_{ij}} y_i - \frac{1}{\tau_{i0}} y_i. \quad (3)$$

Здесь первые два слагаемых в правой части описывают «рождение» вещества данной фракции (рассматриваемого происхождения) в резервуаре  $i$  вследствие привнесения извне и поступления из других резервуаров за счет вещества других фракций.

Решая уравнения (1), можно найти изменения во времени общего содержания рассматриваемого вещества в резервуарах 1, 2, ...,  $N$ .

Решая уравнения (3), можно найти изменения во времени содержания определенной фракции рассматриваемого вещества (часть, имеющую определенное происхождение) в резервуарах 1, 2, ...,  $N$ .

Таким образом, с помощью описанного выше подхода можно решать задачу атрибуции – установления распределения общего содержания какого-либо вещества по источникам его происхождения.



---

В завершение этого раздела сделаем два технических замечания:

1. Если внутрисистемные межрезервуарные потоки  $f_{ij}$  отсутствуют, т. е. эти потоки нулевые при  $i, j > 0$ , то при расчете значений переменных  $y_1, y_2, \dots, y_N$  возможна агрегация. Это означает, что при наличии потоков нескольких фракций  $k = 1, 2, \dots, K$  рассматриваемого вещества  $g_{0i}^1, g_{0i}^2, \dots, g_{0i}^K$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) извне в рассматриваемую систему резервуаров соответствующие решения системы (3)  $y_i^1, y_i^2, \dots, y_i^K$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) можно суммировать по  $k$ , получая при этом решения  $y_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ), соответствующие суммарному поступлению извне  $f_{0i} = g_{0i}^1 + g_{0i}^2 + \dots + g_{0i}^K$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ). Это – следствие того, что уравнения (3) линейны, и их коэффициенты (при нулевых  $f_{ij}$  при  $i, j > 0$ ) не зависят от  $k$ . Таким образом, при необходимости, несколько фракций рассматриваемого вещества можно объединять в одну, обобщенную фракцию и вести расчет для нее.

2. При известных функциях  $X_1(t), X_2(t), \dots, X_N(t)$ , т. е. если система уравнений (1) уже решена, система уравнений (3) является линейной по  $y_1(t), y_2(t), \dots, y_N(t)$ .

3. При решении задачи численными методами систему уравнений (3) следует решать одновременно с интегрированием системы уравнений (1), поскольку для вычисления следующих значений переменных  $y$  не требуется знание будущих значений переменных  $X$ .

## Результаты

Используем описанный выше методический подход для решения следующей задачи атрибуции – разложим общее содержание углекислого газа в атмосфере на естественную и антропогенную составляющие. При этом объектом атрибуции будет углерод, который в атмосфере находится, в основном, в составе  $\text{CO}_2$ . Как известно, самый мощный биогеохимический цикл углерода связан именно с углекислым газом  $\text{CO}_2$ . Поскольку подробное изложение этого вопроса можно найти в работе (IPCC, 2001), а краткую сумму оценок соответствующих потоков - в работе (Семенов, 2004), то здесь мы ограничимся лишь общей характеристикой циркуляции углерода, входящего в состав атмосферного  $\text{CO}_2$ .

При поглощении углекислого газа океаном, входящий в состав  $\text{CO}_2$  углерод переходит в физически растворенный  $\text{CO}_2$  и, далее, в иные формы: бикарбонат-ион  $\text{HCO}_3^-$  и карбонат-ион  $\text{CO}_3^{2-}$ . Затем часть углерода оказывается в составе живых океанских организмов. Они выделяют углекислый газ в процессе дыхания.  $\text{CO}_2$  выделяется также при декомпозиции мортмассы. Из океана в атмосферу выделяется  $\text{CO}_2$ . Выведение из океанских вод за счет образования нерастворимых форм – очень медленный процесс, которым можно пренебречь во временных масштабах столетия-тысячелетия.

Что касается потоков углерода между атмосферой и наземными системами, то из атмосферы углерод, находящийся в составе углекислого газа, большей частью переходит в состав живых организмов (в растения – за счет фотосинтеза - и далее по трофическим цепям). Поток из наземных систем в атмосферу в основном связан с дыханием организмов и декомпозицией мортмассы.

---

Для количественного описания цикла углерода, входящего в состав атмосферного  $\text{CO}_2$ , введем следующие переменные:

$X_a$  – общее содержание углекислого газа в атмосфере в Гт С;

$X_n$  – общее содержание углерода в наземных экосистемах (в живых организмах, мортмассе и почве) в Гт С; его содержанием в пресноводных водоемах пренебрегаем;

$N$  – число модельных горизонтальных слоев океанских вод одинаковой массы; в модели  $N = 400$ ;

$X_n$  – общее содержание углерода в  $n$ -м океанском слое в Гт С;

$f_{0a}$  – глобальный выброс  $\text{CO}_2$  в атмосферу в процессе сжигания ископаемого органического топлива, факельного сжигания газа, а также производства цемента, Гт С год<sup>-1</sup>;

$f_{на}$  – глобальная эмиссия  $\text{CO}_2$  из наземных систем в атмосферу за счет лесного хозяйства, землепользования и изменения в землепользовании.

Изменение введенных переменных  $X$  во времени будет описываться следующей одномерной моделью – системой обыкновенных дифференциальных уравнений (она будет фигурировать под номером (4)):

$$\begin{aligned} \frac{dX_a}{dt} &= f_{0a} + f_{на} + \frac{1}{\tau_{на}} X_n + \frac{1}{\tau_{oa}} X_1 - \frac{aX_a}{X_a + b} - \frac{1}{\tau_{ao}} X_a; \\ \frac{dX_n}{dt} &= \frac{aX_a}{X_a + b} - \frac{1}{\tau_{на}} X_n - f_{на}; \\ \frac{dX_1}{dt} &= \frac{1}{\tau_{ao}} X_a + \frac{1}{\tau_n} X_2 - \frac{1}{\tau_n} X_1 - \frac{1}{\tau_{oa}} X_1; \\ &\dots \\ \frac{dX_n}{dt} &= \frac{1}{\tau_n} X_{n-1} + \frac{1}{\tau_n} X_{n+1} - \frac{2}{\tau_n} X_n; \quad (1 < n < N); \\ &\dots \\ \frac{dX_N}{dt} &= \frac{1}{\tau_n} X_{N-1} - \frac{1}{\tau_n} X_N. \end{aligned}$$

В этой модели все обусловленные естественными процессами потоки углерода между резервуарами – между атмосферой, наземными системами, океанскими слоями - линейно зависят от его содержания в резервуаре-источнике. Есть лишь одно исключение: поток из атмосферы в наземные системы описывается нелинейным выражением  $aX_a/(X_a + b)$ , поскольку интенсивность фотосинтеза зависит не только от концентрации  $\text{CO}_2$ , но имеет естественный предел, обусловленный иными факторами, в том числе мощностью потока фотосинтетически активной радиации, поступающей на поверхность суши. Эта модель была предложена нами в работе (Семенов, 2004, глава 4). Значения ее параметров приведены в табл. 1. В модели форма вертикального профиля концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере считается постоянной, что дает однозначное соотношение между приземной концентрацией и общим содержанием.

При оценке этих параметров в работе (Семенов, 2004) были использованы оценки Межправительственной группы экспертов по изменению климата

(МГЭИК) о суммарных глобальных потоках углерода с середины XIX века (Land Use, Land-use Change, and Forestry, 2000), данные о годовых значениях в 1851 – 1999 гг. глобальной антропогенной эмиссии  $\text{CO}_2$  в атмосферу от сжигания ископаемого топлива, производства цемента, факельного сжигания газа (Marland et al., 2003), а также оценки глобального нетто-потока из наземных резервуаров в атмосферу, связанного с изменением типа и способов землепользования (Houghton, Hackler, 2002; Houghton, 2003).

**Таблица 1.** Параметры естественных процессов в модели (4) цикла углерода (Семенов, 2004, глава 4)

Название параметра	Символ	Значение
Время перехода из атмосферы в верхний слой океана	$\tau_{ao}$	8.4 года
Время перехода из верхнего слоя океана в атмосферу	$\tau_{oa}$	1.14 года
Время перехода из наземных систем в атмосферу	$\tau_{на}$	41.6 года
Время перехода из океанского слоя в соседний	$\tau_{п}$	1.7 года
Предельное значение потока из атмосферы в наземные системы	$a$	62.8 Гт С год <sup>-1</sup>
Модельная константа	$b$	84 Гт С

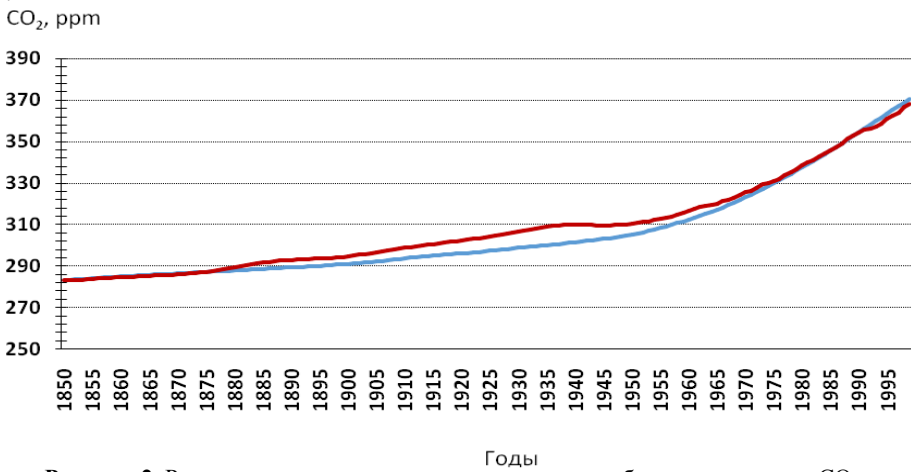
Заметим, что система уравнений (4) является частным случаем системы уравнений (1). Таким образом, для оценки антропогенной фракции общего содержания углекислого газа в атмосфере, происходящей от антропогенных выбросов  $\text{CO}_2$  (от сжигания ископаемого топлива, факельного сжигания газа, производства цемента, землепользования и изменения в землепользовании), можно использовать предложенную в разделе «Метод» расчетную схему, а именно – одновременное решение систем уравнений (1) и (3).

При проведении расчетов считалось, что

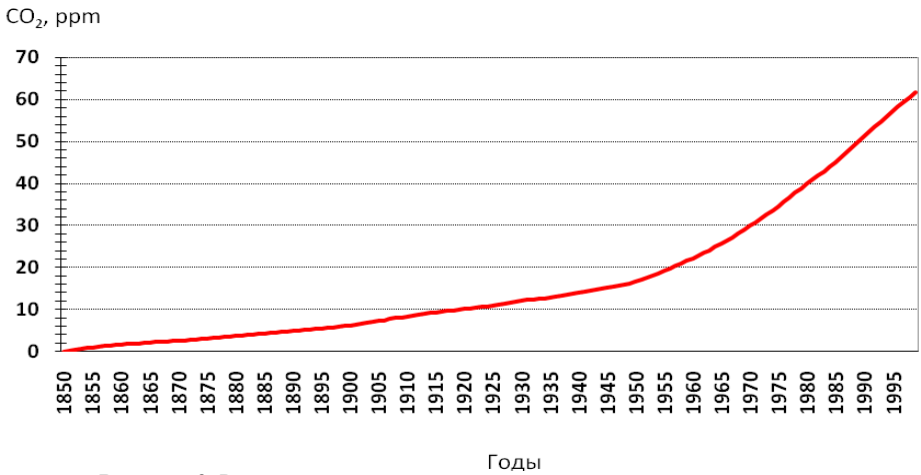
- антропогенные выбросы  $\text{CO}_2$  в атмосферу, связанные со сжиганием ископаемого органического топлива, факельным сжиганием газа, производством цемента, землепользованием и изменением в землепользовании, начались в 1851 г. и
- до этого года рассматриваемый цикл углерода был равновесным, т.е. для каждого резервуара входящие и исходящие потоки углерода были одинаковыми.

Конечно, оба эти предположения являются некоторой идеализацией действительности: антропогенные потоки были малы, а входящие и исходящие потоки углерода примерно уравновешены.

На рис. 2 и 3 представлены некоторые результаты расчета. На рис. 2 видно, что расчетное изменение концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере (синяя кривая) достаточно хорошо соответствует фактическому ходу концентрации в 1851 – 1999 гг. (коричневая линия). Мы, однако, не будем здесь обсуждать эффективность предложенной модели цикла углерода, не это является предметом этой статьи. Обратим внимание на красную кривую на рис. 3. Она изображает результат расчета изменения содержания в атмосфере антропогенной фракции  $\text{CO}_2$ . Из результатов расчета и фактических данных измерений (рис. 2) следует, что за период 1851 – 1999 гг. содержание углекислого газа в атмосфере выросло примерно с 280 ppm до 370 ppm, т.е. на 90 ppm, а антропогенная фракция – см. рис. 3 - увеличилась от 0 до примерно 60 ppm.



**Рисунок 2.** Результаты модельного расчета изменения общего содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере в 1851 – 1999 гг. (синяя линия) и результаты измерений (коричневая линия).



**Рисунок 3.** Результаты модельного расчета изменения антропогенной фракции общего содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере в 1851 – 1999 гг.

Таким образом, выброс порций углекислого газа антропогенного происхождения в рассматриваемый период привел к увеличению содержания в атмосфере фракции CO<sub>2</sub> естественного происхождения (!). Этот контринтуитивный результат целесообразно подробно обсудить, чему посвящен следующий раздел.

### Обсуждение

Полученный результат в какой-то мере не соответствует ожиданиям, что требует дополнительного внимания. Рассмотрим механизм такого явления с помощью простой двухрезервуарной модели, где подобный эффект обнаружится в состоянии равновесия системы.

В резервуарах 1 и 2 содержится некоторое вещество в двух фракциях, оно двух «происхождений»: в количестве  $x_1$  и  $x_2$  единиц массы – естественного происхождения, а в количестве  $y_1$  и  $y_2$  – антропогенного происхождения. Рассма-

триваемое вещество может перемещаться из одного резервуара в другой, причем законы перемещения одинаковы для разных фракций этого вещества.

Брутто-поток рассматриваемого вещества из резервуара 1 в резервуар 2 равен  $F_{12}(X_1)$ , где  $X_1$  – общее содержание рассматриваемого вещества в резервуаре 1. Так же  $F_{21}(X_2)$  – брутто-поток вещества из резервуара 2 в резервуар 1. Функции  $F_{12}$  и  $F_{21}$  непрерывны, принимают нулевые значения при нулевых значениях аргумента, возрастающие.

Будем считать, что суммарное количества вещества в резервуарах 1 и 2 постоянно:  $X_1 + X_2 = S$ ,  $S > 0$ . Таким образом, происходит только перераспределение вещества между резервуарами, и процесс описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$dX_1/dt = -F_{12}(X_1) + F_{21}(X_2); dX_2/dt = F_{12}(X_1) - F_{21}(X_2).$$

Постоянство суммы  $X_1$  и  $X_2$  позволяет выписать следующее уравнение для переменной  $X_1$ :

$$dX_1/dt = -F_{12}(X_1) + F_{21}(S - X_1).$$

В правой части этого уравнения – убывающая непрерывная функция аргумента  $X_1$ , определенная на отрезке  $[0, S]$ . В его левом конце она принимает положительное значение  $F_{21}(S)$ , а в правом – отрицательное значение  $(-F_{12}(S))$ . Таким образом, для  $X_1$  есть устойчивое стационарное значение  $X_1^*$ ,  $0 < X_1^* < S$ , к которому  $X_1$  стремится из любого начального состояния  $X_1(0)$ ,  $0 \leq X_1(0) \leq S$ . Соответствующее устойчивое стационарное значение для  $X_2$  есть  $X_2^* = S - X_1^*$ . Заметим, что при возрастании  $S$  значение  $X_1^*$  возрастает. В силу равноправия обоих резервуаров  $X_2^*$  также будет возрастать при возрастании  $S$ .

Напомним, что рассматриваемое вещество представлено двумя фракциями разного происхождения:  $x_1$  и  $y_1$  – их содержание в резервуаре 1, а  $x_2$  и  $y_2$  – их содержание в резервуаре 2. Переменные  $x$  описывают фракцию естественного происхождения, а  $y$  – антропогенного. Будем считать, что при переходе порций вещества из одного резервуара в другой их происхождение, «фракционная принадлежность», не меняется.

В предположении о «полной перемешанности» вещества обеих фракций в каждом из резервуаров и сохранении «фракционной принадлежности» порций вещества при переходе из одного резервуара в другой справедливы следующие уравнения I – IV, отражающие баланс массы:

$$dx_1/dt = -F_{12}(x_1 + y_1) x_1/(x_1 + y_1) + F_{21}(x_2 + y_2) x_2/(x_2 + y_2) \quad (I)$$

$$dx_2/dt = F_{12}(x_1 + y_1) x_1/(x_1 + y_1) - F_{21}(x_2 + y_2) x_2/(x_2 + y_2) \quad (II)$$

$$dy_1/dt = -F_{12}(x_1 + y_1) y_1/(x_1 + y_1) + F_{21}(x_2 + y_2) y_2/(x_2 + y_2) \quad (III)$$

$$dy_2/dt = F_{12}(x_1 + y_1) y_1/(x_1 + y_1) - F_{21}(x_2 + y_2) y_2/(x_2 + y_2) \quad (IV)$$

Предполагается, что:

- до начального момента времени  $t = 0$  содержание вещества естественной фракции  $x_1(0)$  и  $x_2(0)$  в резервуарах 1 и 2 было равновесным;

- в начальный момент времени антропогенная фракция была внесена в резервуары 1 и 2 в количествах  $y_1(0) \geq 0$  и  $y_2(0) \geq 0$  соответственно,  $[y_1(0) + y_2(0)] > 0$ .

Положим  $S_x = x_1(0) + x_2(0)$  и  $S_y = y_1(0) + y_2(0)$ . В силу сохранения массы вещества каждой из фракций  $S_x \equiv x_1(t) + x_2(t)$  и  $S_y \equiv y_1(t) + y_2(t)$ .

Первое тождество позволяет преобразовать уравнение (I) к следующему виду:

$$dx_1/dt = - (F_{12}(X_1)/X_1) x_1 + (F_{21}(X_2)/X_2) (S_x - x_1).$$

Поскольку  $X_1 \rightarrow X_1^*$  и  $X_2 \rightarrow X_2^*$  при  $t \rightarrow \infty$ , то  $x_1(t)$  асимптотически стремится к

$$x_1^{ac} = S_x (F_{21}(X_2^*)/X_2^*) [F_{12}(X_1^*)/X_1^* + F_{21}(X_2^*)/X_2^*]^{-1} = S_x (\varphi_{12}(X_1^*) / (\varphi_{21}(X_2^*) + 1))^{-1},$$

где  $\varphi_{12}(X_1) = F_{12}(X_1)/X_1$  и  $\varphi_{21}(X_2) = F_{21}(X_2)/X_2$  – удельные брутто-потоки, т.е. в расчете на единицу массы содержащегося в резервуаре вещества. Функции  $\varphi$  определены, строго говоря, при ненулевых значениях своих аргументов.

Теперь заметим, что в частном случае, когда  $F_{12}(X_1) = aX_1/(X_1 + b)$ ;  $F_{21}(X_2) = (1/\tau) X_2$  при  $a, b, \tau > 0$ ,  $x_1(t)$  асимптотически стремится к

$$x_1^{ac} = S_x (a \tau / (X_1^* + b) + 1)^{-1}.$$

Как уже отмечалось ранее, при возрастании  $S$  значение  $X_1^*$  возрастает, и, следовательно, значение  $x_1^{ac}$  возрастает. Именно это и произошло, поскольку в начальный момент времени  $t = 0$  в систему было внесено дополнительное количество вещества  $S_y = y_1(0) + y_2(0) > 0$ , т. е. значение  $S$  возросло с  $S_x$  до  $(S_x + S_y)$ .

Таким образом, если в рассматриваемом частном случае в резервуарах изначально присутствовало только вещество естественного происхождения, и процесс массообмена между обоими резервуарами достиг равновесия, то добавление в систему вещества антропогенного происхождения приведет в новом равновесии к обогащению резервуара 1 веществом естественного происхождения.

Этот эффект связан с тем, что в последнем частном случае удельный поток из резервуара 1 в резервуар 2 убывает с ростом содержания  $X_1$  рассматриваемого вещества:  $\varphi_{12}(X_1) = F_{12}(X_1)/X_1 = a/(X_1 + b)$ , в то время как удельный поток из резервуара 2 в резервуар 1 постоянен:  $\varphi_{21}(X_2) = 1/\tau$ . На качественном уровне это означает, что добавляя вещество антропогенного происхождения в резервуар 1, мы уменьшаем вероятность перехода единицы массы вещества в резервуар 2. Вероятность же перехода из резервуара 2 в резервуар 1 не меняется. Это приводит к обогащению резервуара 1 веществом естественного происхождения за счет резервуара 2.

---

## Заключение

Попытка расчетной оценки части изменения содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере, связанной со сжиганием ископаемого органического топлива, факельным сжиганием газа и производством цемента, с использованием понятийной базы, изложенной в статье 1 РКИК, привела к очевидной недооценке этой фракции.

Принятие принципа сохранения происхождения вещества при переходе из одной компоненты климатической системы в другую позволило получить более реалистичную расчетную оценку антропогенной составляющей изменения содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере за период 1851 – 1999 гг.

Однако, даже при этом условии антропогенная фракция общего содержания углекислого газа в атмосфере в конце рассматриваемого периода несколько меньше фактического изменения общего содержания за этот период. Это означает, что произошло обогащение атмосферы не только веществом антропогенного происхождения, но и естественного. Т. е. антропогенные выбросы  $\text{CO}_2$  привели, в частности, к смещению распределения общего содержания естественной фракции в пользу атмосферы.

Последний эффект можно объяснить нелинейностью зависимости потока углекислого газа из атмосферы в наземные системы. А именно, тем, что этот поток в расчете на единицу содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере убывает с ростом концентрации  $\text{CO}_2$ , в то время как зависимости других межрезервуарных естественных потоков от содержания рассматриваемого вещества в резервуаре-источнике примерно линейны.

Дальнейшее развитие теории атрибуции очевидно необходимо для научно-обоснованного осуществления международных усилий по ограничению роста содержания парниковых газов в атмосфере. Без этого невозможно, в частности, корректно оценить ответственность различных стран (и иных эмиттеров) в наблюдаемое увеличение содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере.

## Список литературы

Семенов С. М. 1996. 'Генетический' подход к расчету вкладов различных источников в общее содержание веществ в окружающей среде. - Доклады Академии наук. Биология, т. 351, N 2, с. 284 – 286.

Семенов С. М., Кунина И. М., Кухта Б. А. 1999. Тропосферный озон и рост растений в Европе. – Москва., Издательский центр "Метеорология и гидрология", 208 с.

Семенов С.М. 2004. Парниковые газы и современный климат Земли. – Москва, Издательский центр "Метеорология и гидрология", 175 с.

Boden, T.A., G. Marland, and R.J. Andres. 2016. Global, Regional, and National Fossil-Fuel  $\text{CO}_2$  Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A. doi 10.3334/CDIAC/00001\_V2016

---

Hegerl, G. C., O. Hoegh-Guldberg, G. Casassa, M. P. Hoerling, R. S. Kovats, C. Parmesan, D. W. Pierce, and P. A. Stott. 2010. Good practice guidance paper on detection and attribution related to anthropogenic climate change. - In: Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Detection and Attribution of Anthropogenic Climate Change [T. F. Stocker, C. B. Field, D. Qin, V. Barros, G.-K. Plattner, M. Tignor, P. M. Midgley and K. L. Ebi (eds.)]. IPCC Working Group I Technical Support Unit, University of Bern. - Bern, Switzerland.

Houghton, R.A., Hackler J.L. Carbon Flux to the Atmosphere from Land-Use Changes. 2002. - In Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A., 2002, <http://cdiac.esd.ornl.gov/>

Houghton R. A. 2003. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850 – 2000. Tellus, 55B, p. 378 – 390.

IPCC 2000. Land Use, Land-Use Change and Forestry - Robert T. Watson, Ian R. Noble, Bert Bolin, N. H. Ravindranath, David J. Verardo and David J. Dokken (Eds.). Cambridge University Press, UK. 375 pp.

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

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

Land Use, Land-use Change, and Forestry. 2000. - Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Watson R. T., Noble I. R., Bolin B., et al., editors). - Cambridge University Press, 377 pp.

Marland G., Boden T., Andres R. J. 2003. Global, Regional, and National CO<sub>2</sub> Emissions. - In Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A., <http://cdiac.esd.ornl.gov/>

*Статья поступила в редакцию: 31.07.2016.*

*После переработки: 24.09.2016.*