

**Сходство изменений в годовом и месячном масштабах времени  
современных концентраций CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и N<sub>2</sub>O на станциях глобального  
мониторинга**

*Расширенные тезисы доклада*

С.М. Семенов<sup>1,2</sup>, Э.Я. Ранькова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>)Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН

<sup>2</sup>)Институт географии РАН

Углекислый газ CO<sub>2</sub>, метан CH<sub>4</sub> и закись азота N<sub>2</sub>O – считаются основными парниковыми газами среди тех, которые эмиттируются в ходе хозяйственной деятельности. Обогащение ими атмосферы вызывает обеспокоенность в мире в связи с последствиями этого - усилением парникового эффекта. Поэтому современные изменения глобальных уровней содержания этих газов в атмосфере являются предметом непрерывного мониторинга и последующих исследований, чему посвящена и данная работа.

Использовались данные мониторинга концентраций CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и N<sub>2</sub>O с пробоотборных станций сети CSIRO (CSIRO GASLAB Flask Sampling Network, The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia. Станции расположены в таких точках географического пространства, где практически не сказывается влияние конкретных антропогенных источников эмиссии этих газов, а уровни их содержания определяются процессами глобального переноса и перемешивания в атмосфере. Расположение станций приведено на рис. 1, а географические характеристики - в табл. 1, см. <http://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/co2/csiro/>. В работе использованы данные о концентрациях месячного разрешения на этих станциях (использован архив <CSIRO\_gaslab\_data\_Jul2015.zip> с ресурса via [http://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/co2/modern\\_co2.html](http://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/co2/modern_co2.html) (→DATA, →CSIRO)). Станционные данные различного временного разрешения также доступны на ресурсе <https://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg/cgi-bin/wdcgg/catalogue.cgi> Мирового центра ВМО по парниковым газам (WMO World Data Centre for Greenhouse Gases).

Измерения на пробоотборных станциях сети CSIRO проводились флажечным способом, т.е. определенный объем воздуха отбирался в специальные емкости (фляги, англ. – flask) и затем анализировался в лаборатории. Измерения выполнялись в основном с начала 1990х годов. Эту многолетнюю работу ведут известные специалисты CSIRO Paul Steele, Paul Krummel, Ray Langenfelds, Marcel van der Schoot и др. Эта группа обеспечивает мониторинг концентраций, первичную подготовку массивов данных и их содержательный анализ, см. например (Francey et al., 2003; Francey et al., 2013).

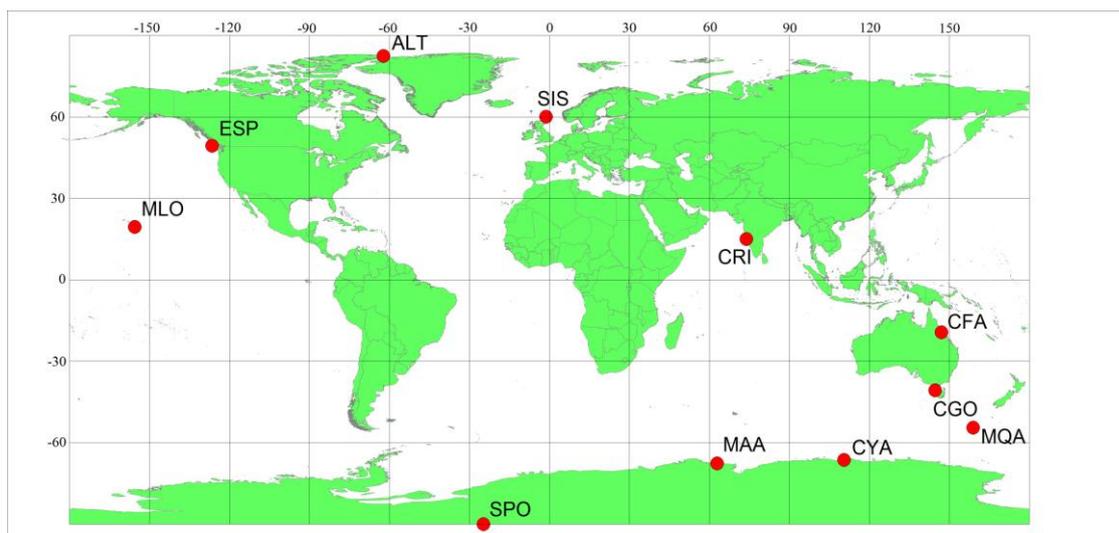


Рисунок 1 - Сеть пробоотборных станций Научной и промышленной исследовательской организации Содружества наций, Австралия (<http://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/co2/csiro/>)

Таблица 1. Характеристики расположения станций и временное покрытие рядов месячных данных сети флажечных измерений концентраций парниковых газов Научной и промышленной исследовательской организации Содружества наций (CSIRO). Высоты приведены в метрах над уровнем моря (м н.у.м.), широта и долгота - в градусах. Источник: <http://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/co2/csiro/>.

Код станции	Название и расположение станции	Широта	Долгота	Высота станции	Высота отбора проб	Временной отрезок
ALT	Alert, Канада	82.50	-62.33	200	210	1991 – 2014
ESP	Estevan Point, Канада	49.38	-126.53	7	47	1993 - 2002
SIS	Shetland Islands, Великобритания	60.08	-1.25	30	33	1992 - 2003
MLO	Mauna Loa, США	19.53	-155.57	3397	3435	1991 - 2014
CRI	Cape Rama, Индия	15.08	73.83	60	66	1993 – 2002 2009 - 2013
CFA	Cape Ferguson, Австралия	-19.28	147.05	2	5	1991 – 2014
CGO	Cape Grim, Ав-	-40.68	144.69	94	164	1984 –

	стралия					2014
CYA	Casey, Антарктида	-66.28	110.51	47	55	1997 – 2014
MAA	Mawson, Антарктида	-67.61	62.86	32	42	1984 – 2014
MQA	Macquarie Island, Австралия	-54.48	158.96	6	13	1990 – 2014
SPO	South Pole, Антарктида	-89.98	-24.8	2837	2847	1991 – 2014

CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и N<sub>2</sub>O – хорошо перемешанные газы (well-mixed gases). Время их жизни в атмосфере – безвозвратного или же возвратного выведения из атмосферы) – существенно больше, чем время распространения и перемешивания в тропосфере (в горизонтальном и вертикальном направлениях). Следствие – примерное выравнивание концентраций (в объемном отношении смеси, англ. – volume mixing ratio) в различных точках географического пространства, не находящихся под непосредственным влиянием конкретных источников эмиссии.

Однако то, что приповерхностные концентрации близки, не означает, что они одинаковы и постоянны. Для каждого из газов наблюдается определенная изменчивость во времени и пространстве. Наша задача:

– охарактеризовать изменчивость концентраций (в объемном отношении смеси – ppm или ppb) для каждой из станций в годовом и месячном масштабах времени, а также

- оценить степень сходства этих изменений на разных станциях для каждого из газов.

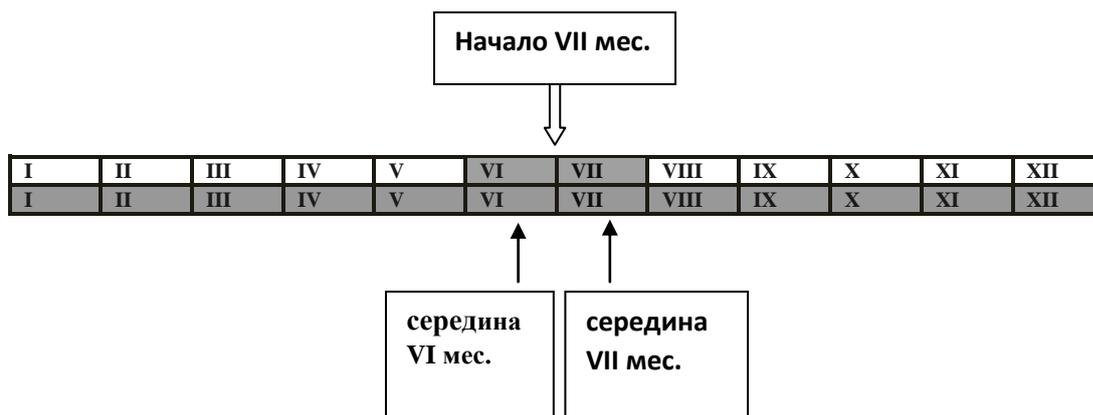


Рис. 2. На двух шкалах, представляющих 12 последовательных месяцев, выделены светло-серым цветом отрезки времени, которые использовались для построения элементов ряда А (нижний ряд) и Б (верхний ряд), относящихся к началу VII-го месяца. Значение месячного скользящего среднего для этого срока оценивалось как среднее арифметическое среднемесячных значений концентраций за VI и VII месяцы.

Для решения этой задачи использовался следующий метод. Для каждой станции и ряда среднемесячных концентраций газа, строились три производных ряда:

А) ряд, представляющий скользящие среднегодовые значения, т.е. средние за последовательные 12 месяцев; такое среднегодовое значение относилось к 0 ч VII месяца, т.е. границе между VI и VII месяцем;

Б) ряд, представляющий скользящее среднемесячное значение для этого же срока, которое вычислялось как среднее из значений за VI и VII месяцы.

Рис. 2 иллюстрирует те отрезки времени, которые использовались для построения рядов типа А и Б. Различия в продолжительности месяцев календарного года не учитывались.

Для каждой станции изменчивость концентрации газа в годовом масштабе времени характеризовалась рядом **А**, в изменчивость в месячном масштабе – разностью рядов Б и А (обозначим его символом **Б-А**). Ниже приведены некоторые результаты такого анализа для 11 станций сети CSIRO.

### *Изменчивость в годовом масштабе времени*

На рис. 3, 4 и 5 приведены ряды типа А для 11 станций для  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{N}_2\text{O}$  соответственно.

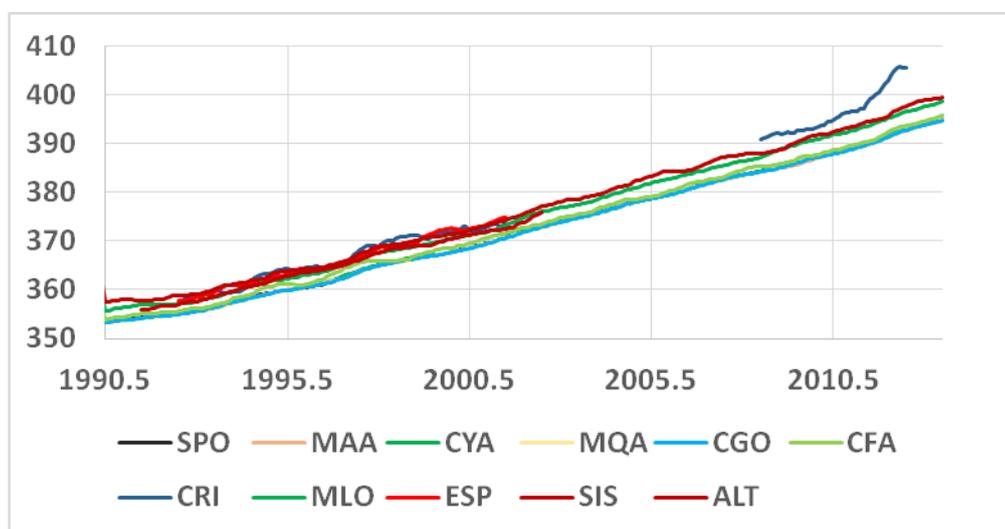


Рисунок 3 – Изменение во времени 12-месячных скользящих средних: содержание  $\text{CO}_2$ ,  $\text{млн}^{-1}$

Как видно на рис. 3, тренды разных станций одинаковы. После «приведения» данных к значениям на станции Alert (самая северная станция Северного полушария; ее выбор, конечно, условен) путем удаления систематических различий в данных, кривые практически сливаются. Исключение – станция Cape Rama (Индия), по-видимому, находящаяся под сильным влиянием региональных источников углекислого газа.

На рис. 4 представлены аналогичные данные об изменении содержания метана в годовом масштабе времени. Систематические различия с данными по станции Alert удалены. Видно (см. панель а), что тренды на всех станциях Южного полушария (от тропической станции Cape Ferguson до самой южной полярной станции South Pole) очень близки. Однако и на станциях Северного полушария наблюдаются сходные тренды – кривые близки к средней для Южного полушария. Опять, исключение – индийская станция Cape Rama, данные которой показывали аномальное поведение и для CO<sub>2</sub> (см. выше).

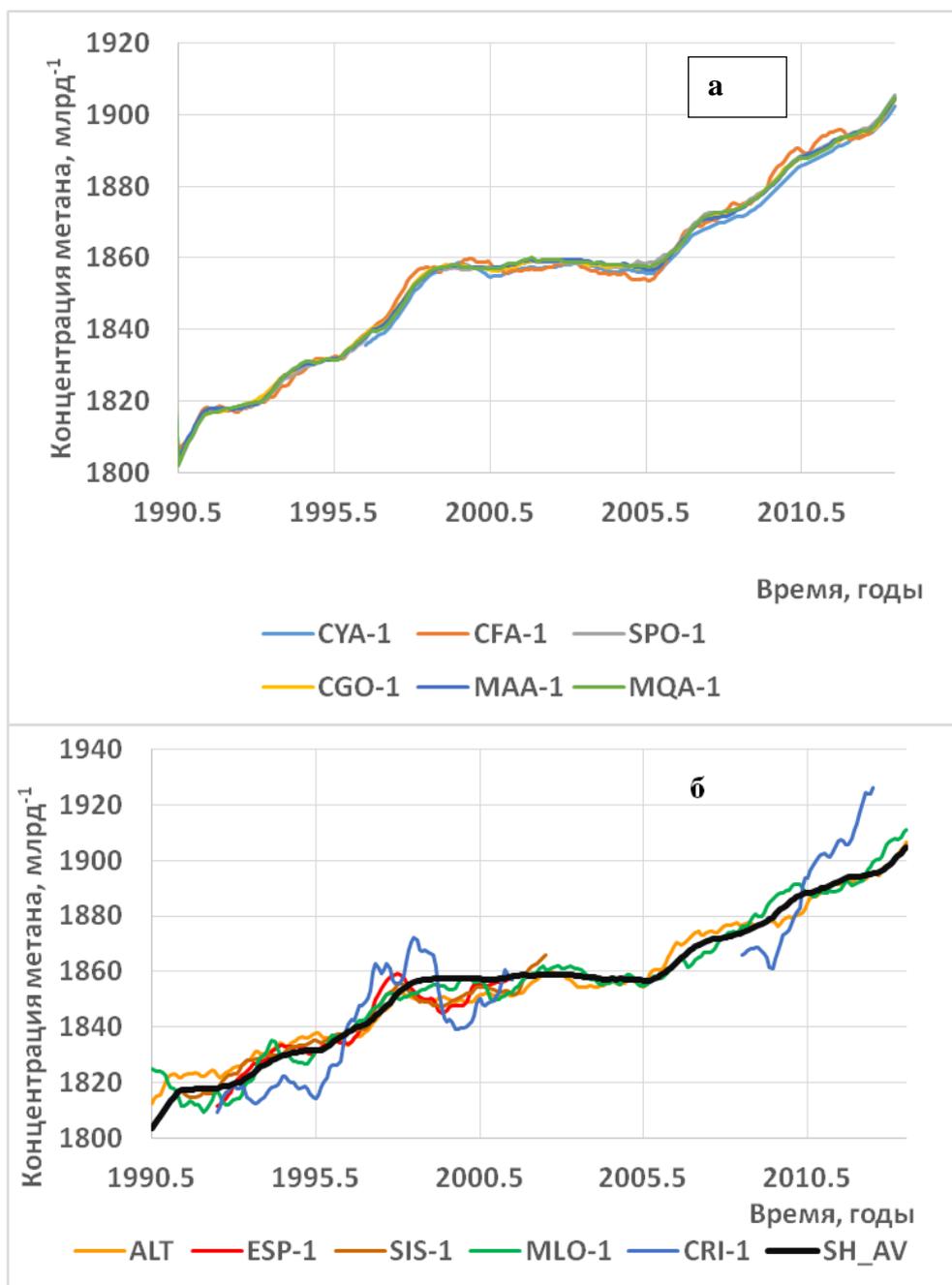


Рисунок 4 - Изменение во времени скользящих 12-месячных средних: содержание CH<sub>4</sub>, млрд<sup>-1</sup>; удалены систематические различия с данными станции Alert (в знак чего к кодам станций прибавлено «-1»): а) станции Южного по-

лушария; б) станции Северного полушария и среднее для станций Южного полушария – черная линия (SH\_AV).

На рис. 5. приведены аналогичные данные по закиси азота. В данном случае систематические различия с данными станции Alert не удалялись, поскольку они очень незначительные и, если их удалить, кривые будут неразличимы. Это здесь касается и станции Cape Rama, данные с которой в отношении закиси азота не показывают существенного аномального поведения.

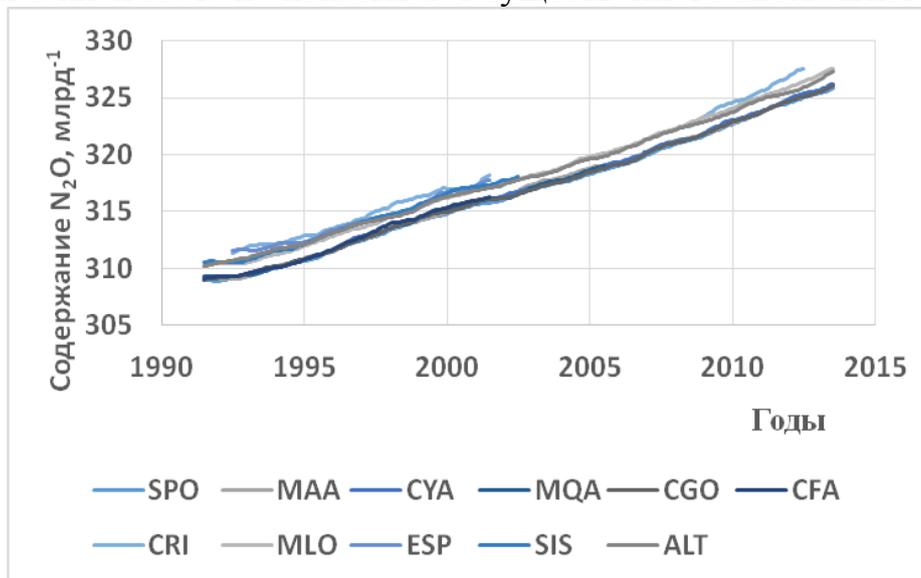


Рисунок 5 – Изменение во времени скользящих 12-месячных средних: содержание N<sub>2</sub>O, млрд<sup>-1</sup>

### *Изменчивость в месячном масштабе времени*

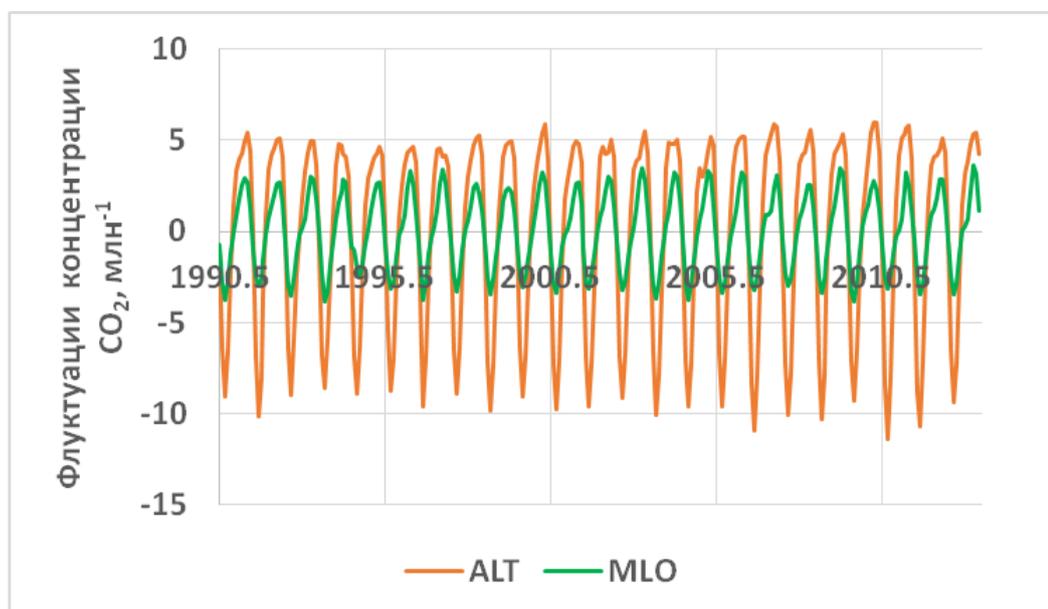
Сравнительный анализ изменчивости содержания CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и N<sub>2</sub>O в атмосфере на станциях сети CSIRO в месячном масштабе времени проводился следующим образом. Для каждой упорядоченной пары станций рассматривались их ряды типа Б-А (см. выше). Ряд для второй станции смещался во времени на несколько месяцев – от -6 до 5 – относительно первого<sup>1</sup>. Затем рассчитывался коэффициент корреляции рядов. Для каждой упорядоченной пары станций определялся сдвиг во времени второго ряда относительно первого, обеспечивающий максимальное значение коэффициента корреляции. Такой сдвиг будем называть оптимальным.

Результаты расчетов показали, что для CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> ряды типа Б-А даже очень удаленных друга от друга станций имеют высокие значения коэффициента корреляции. Колебания демонстрируют сезонную цикличность, имеющую довольно устойчивую форму. Приведем несколько примеров.

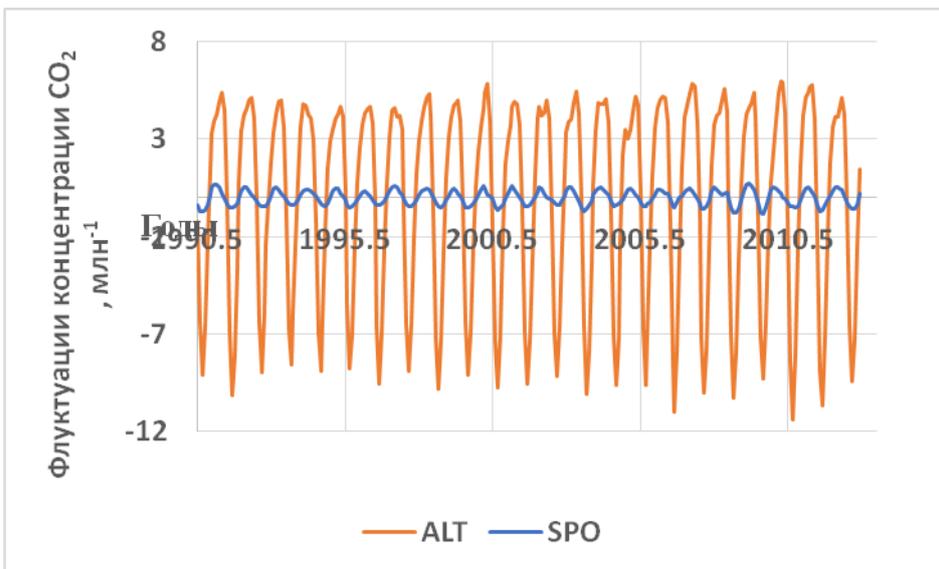
<sup>1</sup> Для облегчения терминологии: если сдвиг ряда происходит в сторону более поздних дат, то будем называть это «сдвиг ПО времени», а если в сторону более ранних дат – «сдвиг ПРОТИВ времени».

На рис. 6 для  $\text{CO}_2$  приведены графики рядов типа Б-А для пары станций ALT и MLO (панель а) и для пары станций ALT и SPO (панель б). Коэффициенты корреляции для этих рядов составляют 0.95 (ряд станции MLO сдвинут на 1 месяц против времени) и 0.87 (ряд станции SPO сдвинут на 5 месяцев по времени) соответственно, хотя расположены они весьма далеко друг от друга – ALT в высоких широтах Арктики, MLO в тропической части Тихого океана (Гавайи, США), а SPO - на южном полюсе. Амплитуды убывают в направлении от северной полярной зоны к южной, что типично для всей совокупности станций. Коэффициенты корреляции для станций, расположенных в умеренной и полярной зонах обоих полушарий, высоки – от 0.8 до 0.9 и более при соответствующих оптимальных временных сдвигах. Для станций CFA и CRI они также достоверны, но заметно меньше, 0.5-0.8. В докладе будет приведена полная матрица коэффициентов корреляции и оптимальные временные сдвиги.

Отметим, что на сезонность колебаний концентрации углекислого газа указывалось еще в работе (Keeling et al., 2005). В последнее время эти сезонные колебания изучают также и у нас в стране по данным спутникового зондирования – см. (Рокотян и др., 2014). В последней работе приведена обширная библиография по вопросу.



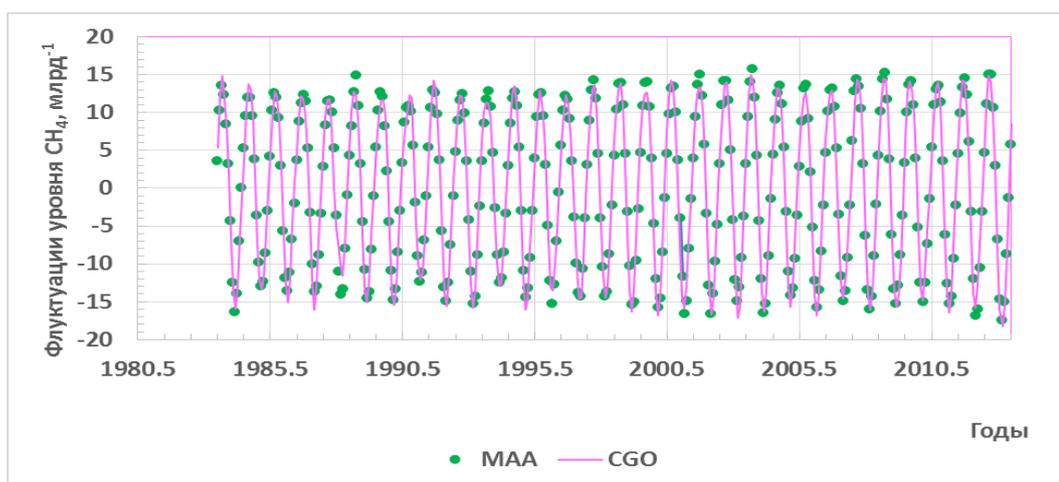
а)



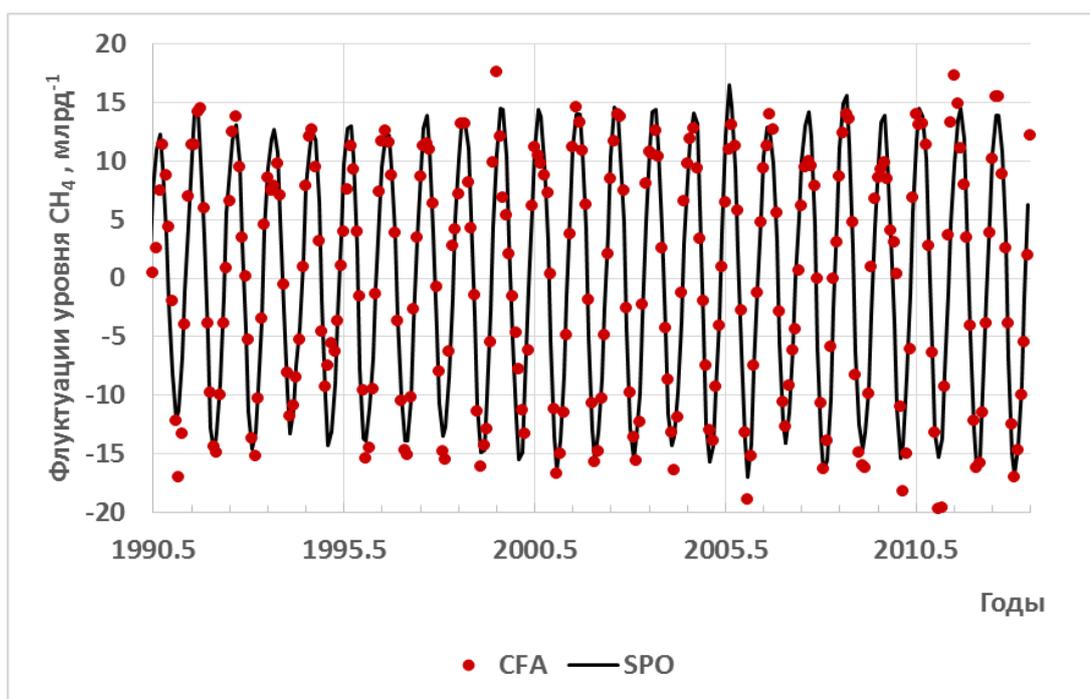
б)

Рисунок 6 - Флуктуации концентраций  $\text{CO}_2$ ,  $\text{млн}^{-1}$ ; месячный масштаб времени: а) на станциях ALT и MLO, причем ряд станции MLO сдвинут на 1 месяц против времени; б) на станциях ALT и SPO (ряд станции SPO сдвинут на 5 месяцев по времени).

В еще большей степени сходство изменений концентраций на станциях CSIRO выражено для  $\text{CH}_4$ . Высокое сходство флуктуаций концентрации метана в месячном масштабе времени наблюдается на всех станциях Южного полушария - см. примеры рядов типа Б-А на рис. 7. Оценки коэффициентов корреляции между станциями Южного полушария не менее 0.99 и лишь для тропической станции CFA 0.94 - 0.96. Эти уровни корреляции достигаются при соответствующих оптимальных временных сдвигах.



а)



б)

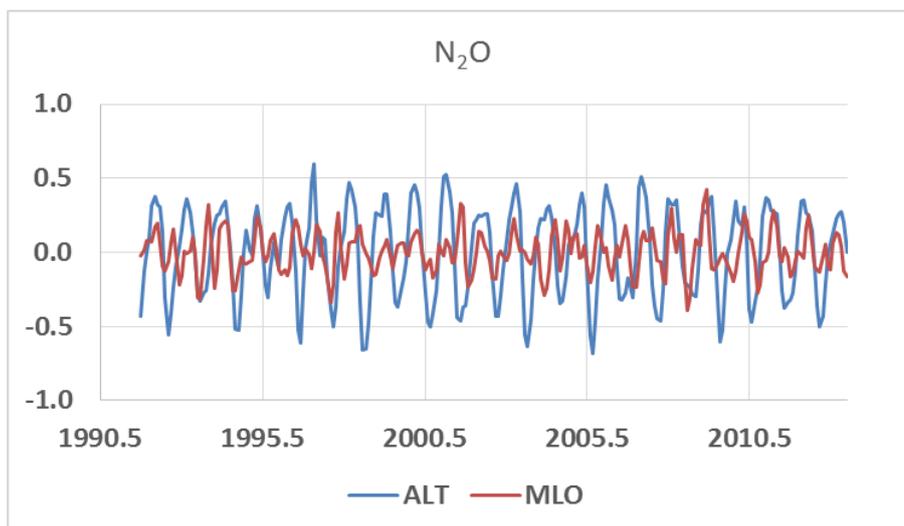
Рисунок - 7. Флуктуации концентраций  $\text{CH}_4$  на станциях Южного полушария,  $\text{млрд}^{-1}$ ; месячный масштаб времени: а) на станциях MAA и CGO (без временного сдвига); б) на станциях SPO и CFA (ряд станции SPO сдвинут на 1 месяц против времени)

Ряды типа Б-А станций Северного полушария также - при соответствующих оптимальных сдвигах - характеризуются значительными коэффициентами корреляции, 0.7 - 0.8. Они заметно ниже значений для Южного полушария.

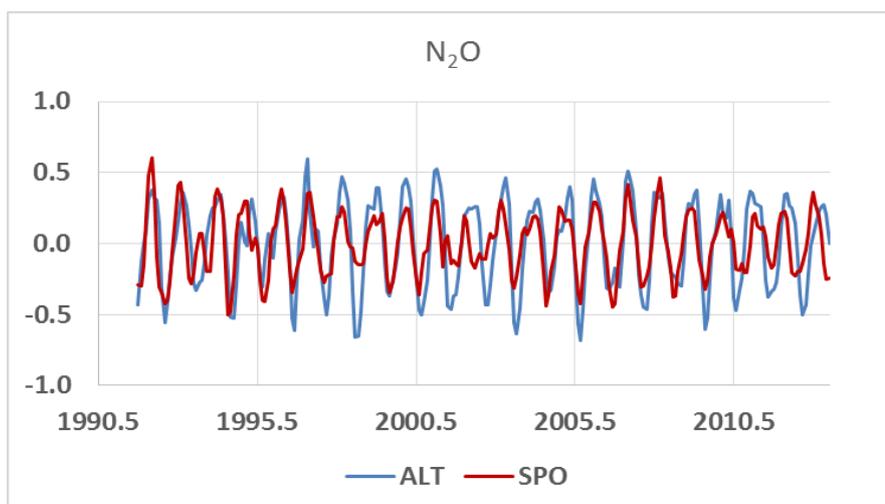
Ряд типа Б-А, построенный по данным с высокоширотной полярной станции Alert (ALT,  $82.5^\circ$  с.ш.) также имеет высокое корреляционное сходство со всеми станциями Южного полушария. Значение коэффициента корреляции для рядов с этих станций следующие: 0.92 для SPO, 0.91 для MAA, 0.91 для SYA, 0.94 для MQA и 0.89 для CFA. Однако, чтобы добиться такого сходства, необходимо сдвинуть ряды этих станций по времени на 5 месяцев. Полная матрица коэффициентов корреляции и оптимальные временные сдвиги будут представлены в докладе.

Обратимся теперь к результатам подобных расчетов для  $\text{N}_2\text{O}$ . Корреляционные связи между изменениями концентрации этого газа в месячном масштабе времени гораздо слабее, чем для углекислого газа и метана. На рис. 8 приведены графики для пар станций ALT и MLO (панель а) и ALT и SPO (панель б)), причем ряды станций MLO и SPO сдвинуты по времени на 3 месяца. Это – оптимальные сдвиги, обеспечивающие максимальные значения коэффициента корреляции; эти коэффициенты 0.24 и 0.72 соответственно. Эти оценки согласуются с рис. 8: для первой пары станций связь флуктуаций

мала, а для второй – весьма заметна, но в некоторые годы пропадает. Тем не менее, на наличие такой связи для станций, расположенных практически на противоположных полюсах Земли стоит обратить внимание. Полная матрица коэффициентов корреляции и оптимальные временные сдвиги будут представлены в докладе.



а)



б)

Рисунок - 8. Флуктуации концентраций  $N_2O$ , млрд<sup>-1</sup>; месячный масштаб времени: а) на станциях ALT и MLO (ряд станции MLO сдвинут по времени на 3 месяца); б) на станциях ALT и SPO (ряд станции SPO сдвинут по времени на 3 месяца)

### Заключение

Изменение во времени концентраций парниковых газов - основных компонентов антропогенной эмиссии  $CO_2$ ,  $CH_4$  и  $N_2O$  – на станциях глобального мониторинга определяется тремя процессами:

1) обменом «местной» части атмосферы с глобальной (локальное влияние отсутствует, что должно обеспечиваться выбором станции глобального мониторинга);

2) обменом с океаном;

3) расходом веществ в химических реакциях в атмосфере.

Эти три процесса в разной степени принимают участие в судьбе рассматриваемых газов.

Первый процесс для всех трех газов общий. В притекающих воздушных массах пропорции содержания рассматриваемых веществ такие же, как в глобальном пуле, а в покидающих местную атмосферу – такие же как в ней.

К обмену с океаном – второй процесс – способен только углекислый газ, причем существенную роль в этом играет сезонность процесса фотосинтеза в эуфотическом слое океана. Океанская эмиссия метана за счет анаэробного разложения мертвого органического вещества мала, а поглощение пренебрежимо мало. Закись азота океан практически не выделяет и не поглощает.

Только метан имеет основной химический сток – третий процесс – в нижней атмосфере – он расходуется в реакциях с гидроксил-радикалом, который, в свою очередь, образуется из водяного пара. Этот процесс также имеет выраженную сезонность, поскольку гидроксил-радикал образуется при участии коротковолнового солнечного излучения.

Результаты эмпирического анализа изменения концентраций  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{N}_2\text{O}$  с 1990х годов на станциях глобального мониторинга сети CSIRO можно предварительно суммировать следующим образом:

- для каждого из трех газов тренды концентраций в годовом масштабе времени, которые характеризуются изменениями годовых скользящих средних (ряды типа А), сходны на всех станциях (исключение – индийская станция Cape Rama);

- ряды разностей скользящих среднемесячных значений и скользящих среднегодовых значений (ряды типа Б-А) характеризуют изменения концентраций в месячном масштабе времени; корреляции этих рядов для  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  после применения специфических сдвигов во времени высоки, особенно для метана, даже для станций, расположенных в разных полушариях, причем сдвиги имеют сезонный характер; для  $\text{N}_2\text{O}$  такой корреляции не наблюдается;

- обнаруженные взаимосвязи в изменении рядов концентраций на различных станциях не противоречат следующему положению: изменчивостью концентраций  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в месячном масштабе времени управляют сезонные процессы – соответственно фотосинтез и разрушение метана в реакциях с гидроксил-радикалом.

## Благодарности

Авторы признательны д-ру Полу Краммелу (Paul Krummel, CSIRO) за предоставление пополненного архива данных о концентрациях углекислого газа, метана и закиси азота на сети пробоотборных станций CSIRO.

## Список литературы

Рокотян Н.В., Imasu R., Захаров В.И., Грибанов К.Г., Хаматнурова М.Ю. Амплитуда сезонного цикла CO<sub>2</sub> в атмосфере Уральского региона по результатам наземного и спутникового ИК-зондирования– Оптика атмосферы и океана, 27, N 96, 2014, с. 819-825.

Francey, R.J., L.P. Steele, D.A. Spencer, R.L. Langenfelds, R.M. Law, P.B. Krummel, P.J. Fraser, D.M. Etheridge, N. Derek, S.A. Coram, L.N. Cooper, C.E. Allison, L. Porter and S. Baly, The CSIRO (Australia) measurement of greenhouse gases in the global atmosphere, *report of the 11<sup>th</sup> WMO/IAEA Meeting of Experts on Carbon Dioxide Concentration and Related Tracer Measurement Techniques*, Tokyo, Japan, September 2001, S.Toru and S. Kazuto (editors), World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch, 97-111, 2003.

Francey, R. J., C. M. Trudinger, M. van der Schoot, R. M. Law, P. B. Krummel, R. L. Langenfelds, L. P. Steele, C. E. Allison, A. R. Stavert, R. J. Andres and C. Rödenbeck, Atmospheric verification of anthropogenic CO<sub>2</sub> emission trends, *Nature Climate Change*, doi: 10.1038/NCLIMATE1817, 2013.

Keeling C. D., Piper S. C., Bacatow R. B., Wahlen M., Whorf T. P., Heimann P. M., Meijer H. A. 2005. Atmospheric CO<sub>2</sub> and <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> exchange with the terrestrial biosphere and oceans from 1978 to 2000: observations and carbon cycle implications, pages 83-113, in "A History of Atmospheric CO<sub>2</sub> and its effects on Plants, Animals, and Ecosystems", editors, Ehleringer, J.R., T. E. Cerling, M. D. Dearing, Springer Verlag, New York.

Steele L. P., Krummel P. B., Langenfelds R. L. 2007. Atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations from sites in the CSIRO Atmospheric Research GASLAB air sampling network (August 2007 version). 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, TN, U.S.A.