

СОДЕРЖАНИЕ CO₂ В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ В КОНЦЕ XX – НАЧАЛЕ XXI ВЕКА: ЭМПИРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ГЛОБАЛЬНОЙ СЕТИ CSIRO

С.М. Семенов

Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН,
Россия, 107258, Москва, ул. Глебовская, д. 20б; SergeySemenov1@yandex.ru

Институт географии РАН,
Россия, 119017, Москва, Старомонетный пер., дом 29

Реферат. Проанализированы тенденции изменения уровня содержания CO₂ (объемного отношения смеси) в приповерхностном слое атмосферы в 1992-2014 гг. по данным фляжечной сети Научной и промышленной исследовательской организации Содружества наций (The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, сокращенно – CSIRO). Эмпирический анализ показал, что изменение во времени среднегодовых значений сходно в разных точках пространства – различия значений на разных станциях с достаточной точностью можно считать постоянными во времени. Внутригодовой ход среднемесячных значений для групп станций, расположенных в умеренных и полярных широтах Северного и Южного полушарий, сходен на станциях одной группы и различается для станций разных групп. Для первой, северной группы среднемесячный уровень CO₂ в течение календарного года выше среднегодового в холодное время года, а в июне - октябре – ниже. Для второй, южной группы в теплое время календарного года уровень относительно стабилен, а в холодное время года (апрель - сентябрь) возрастает.

Ключевые слова. Современный, фоновый, глобальный, уровень, углекислый газ, изменение, данные, мониторинг, фляжечная сеть, CSIRO.

CO₂ CONTENT IN THE ATMOSPHERIC SURFACE LAYER AT THE END OF THE 20th CENTURY AND BEGINNING OF THE 21st CENTURY: AN EMPIRICAL ANALYSIS OF DATA FROM THE GLOBAL CSIRO NETWORK

S.M. Semenov

Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russia, SergeySemenov1@yandex.ru

Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences,
29, Staromonetny lane, 109017, Moscow, Russia

Abstract. The tendencies of changes in CO₂ content in the atmospheric surface layer (volume mixing ratio) in 1992-2014 are analyzed using data from the flask network of the Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization

(CSIRO). An empirical analysis has shown that changes in the annual means are similar over space, namely, differences between values from different station can be considered as constant in time with rather high precision. The within-year course of monthly means for the groups of stations from temperate and polar latitudes of the Northern and Southern hemispheres is similar within the groups and different at stations of different groups. Over the calendar year, for the first (northern) group, a monthly mean CO₂ level exceeds on average the annual mean during the cold season, while it is less than the annual mean in June-October. For the second (southern) group, the level is relatively stable in the warm periods of calendar year, while it increases in the cold period (April-September).

Keywords. Present day, background, global, level, carbon dioxide, change, data, monitoring, flask network, CSIRO.

Введение

Способность некоторых атмосферных газов поглощать и испускать инфракрасное излучение была исследована еще в XIX веке. Именно содержание этих газов, прежде всего водяного пара, в атмосфере Земли определило базовый парниковый эффект. Благодаря ему термические условия на Земле достаточно комфортны для человека. Но лишь в 1930х годах Г.С. Колиндер (Guy Stewart Callendar, 1898–1964) опубликовал работу (Callender, 1938), в которой сообщил, что глобальное содержание углекислого газа в атмосфере нашей планеты заметно выросло вследствие сжигания ископаемого органического топлива, и при этом климат теплеет.

Во второй половине XX века объемы сжигания такого топлива стали быстро расти, что не могло не привести к дальнейшему росту содержания CO₂. Пришло время реализации идеи мониторинга фоновое глобальное содержание парниковых газов в атмосфере. В 1958 г. Ч.Д. Килинг (Charles David Keeling, 1928-2005) начал систематически измерять уровень CO₂ на станции Мауна-Лоа (Mauna Loa), Гавайи, США. Это – высокогорная станция, расположенная на высоте 3397 м над уровнем моря; ее координаты - 19.5° с.ш., 155.6° з.д. Впоследствии на основе этих данных Ч.Д. Килингом с соавторами был опубликован ряд фундаментальных работ.

С тех пор многие ведущие научные центры по наукам о Земле сформировали свои сети глобального фоновое мониторинга содержания парниковых газов. К настоящему времени уже накоплены данные за несколько десятков лет. Их пространственный охват – глобальный, от Северного до Южного полюса. Эти данные служат основой и эмпирического анализа, и модельных исследований в области формирования глобальных уровней содержания CO₂ в атмосфере и их антропогенных изменений.

Цель данной работы: провести эмпирический анализ сходства и различий в изменении и изменчивости уровня CO₂ на различных широтах в конце XX – начале XXI века используя массив данных о содержании CO₂ в приповерхностном слое атмосферы, полученных с помощью одинаковых методических подходов.

Данные и методы

В отношении термина глобальный фоновый мониторинг содержания какого-либо вещества в приповерхностном слое атмосферы среди ученых всегда существовали две противоположные точки зрения. Он понимается как процесс продолжающихся систематических наблюдений/измерений одинаковыми или же сопоставимыми методами с целью получения информации для оценки (и здесь точки зрения расходятся)

а) уровня содержания в каждой точке (в идеале) пространства в любой момент времени или же

б) уровней содержания в тех точках географического пространства и в те моменты времени, где/когда эти уровни формируются за счет процессов глобального масштаба, протекающих в земной системе.

В данной работе это расхождение обсуждаться не будет. Мы будем придерживаться понимания б), поскольку формулировка а) более соответствует термину 'повсеместный непрерывный мониторинг'. Последний вид мониторинга вряд ли осуществим в глобальном масштабе на базе инструментальных измерений по причине затратности, а лишь возможен с помощью дистанционных спутниковых методов.

При инструментальном мониторинге уровня содержания CO_2 в приповерхностном слое существуют два основных подхода – измерения *in situ*, т.е. с помощью прибора на станции, 'на месте', и «фляжечные измерения» (flask measurements), когда некоторый объем воздуха отбирается в определенную пробоотборную емкость, 'флягу', а измерения производятся позже в лаборатории.

Одну из крупнейших глобальных сетей фляжечных измерений имеет Австралия. Эта сеть относится к Научной и промышленной исследовательской организации Содружества наций (The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, сокращенно – CSIRO). Океанская и атмосферная лаборатория этой организации (CSIRO Oceans and Atmosphere – GASLAB) курирует работу этой сети и предоставляет в режиме свободного доступа в ИНТЕРНЕТ результаты оценок уровней содержания ряда парниковых газов, в том числе CO_2 (http://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/co2/modern_co2.html; <ftp://ftp.dar.csiro.au/pub/data/gaslab/>). В этой работе участвуют ведущие специалисты CSIRO (в том числе Paul Steele, Paul Krummel, Ray Langenfelds, Marcel van der Schoot). В данной статье используются данные этой лаборатории, обновленные в июле 2015 г. На рис. 1 отмечены места расположения станций сети фляжечных измерений концентраций парниковых газов CSIRO, где проводились измерения уровней CO_2 , а в табл. 1 – их географические характеристики. Методические вопросы отбора и анализа проб воздуха, а также первичной обработки данных измерений, изложены в работах (Francey et al, 1996; Francey et al, 2003).

На упомянутом выше интернет-ресурсе приведены, в том числе, среднемесячные значения содержания CO_2 (ppm) и их стандартные отклонения.

Данные в целом покрывают отрезок времени 1991-2014 гг., но в данных по некоторым элементам сети (станциям) имеются значительные провалы.

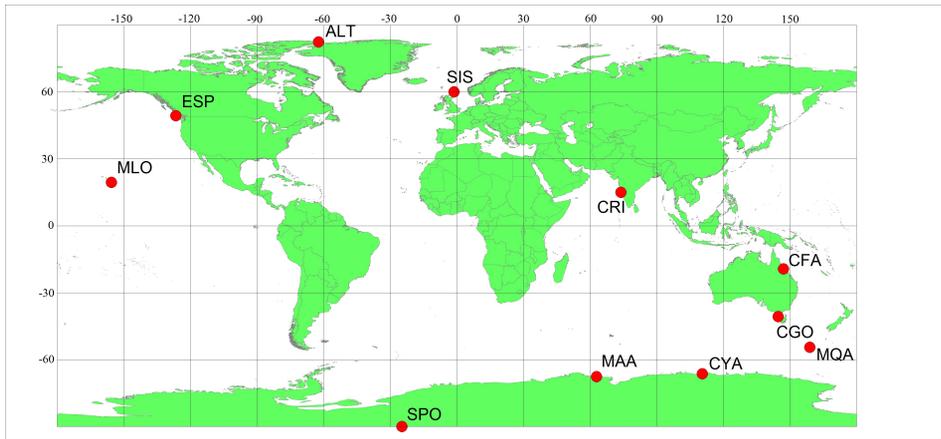


Рисунок 1. Глобальная сеть фляжных измерений концентраций парниковых газов Научной и промышленной исследовательской организации Содружества наций (CSIRO)

Таблица 1. Географические характеристики сети фляжных измерений концентраций парниковых газов Научной и промышленной исследовательской организации Содружества наций (CSIRO)

Код станции	Название и расположение станции	Широта	Долгота	Высота станции	Высота отбора пробы
ALT	Alert, Канада	82.50	-62.33	200	210
CFA	Cape Ferguson, Австралия	-19.28	147.05	2	5
CGO	Cape Grim, Австралия	-40.68	144.69	94	164
CRI	Cape Rama, Индия	15.08	73.83	60	66
CYA	Casey, Антарктида	-66.28	110.51	47	55
ESP	Estevan Point, Канада	49.38	-126.53	7	47
MAA	Mawson, Антарктида	-67.61	62.86	32	42
MLO	Mauna Loa, США	19.53	-155.57	3397	3435
MQA	Macquarie Island, Австралия	-54.48	158.96	6	13
SIS	Shetland Islands, Великобритания	60.08	-1.25	30	33
SPO	South Pole, Антарктида	-89.98	-24.8	2837	2847

Примечание. Высоты приведены в метрах над уровнем моря (м н.у.м.), широта и долгота – в градусах.

Результаты

При анализе данных по каждой станции нами вычислялись среднегодовые значения уровней CO_2 для тех годов, за которые есть данные за все 12 месяцев. При этом в качестве среднегодовых оценок использовались взвешенные суммы среднемесячных значений. Веса для них выбирались пропорционально доле суток в месяце от 365. Результат этих вычислений – оценка изменения во времени среднегодовых значений для данной станции.

Для самой северной станции ALT (ее выделение в данном случае условно) вычислены разности (a) среднегодовых значений содержания CO_2 на этой станции и на каждой из остальных 10 станциях. Разумеется, использовались лишь те года, за которые есть оценки среднегодовых значений для обеих станций. Приведем в табл. 2 средние значения этих разностей и их стандартные отклонения.

Таблица 2. Разности a , их стандартные отклонения σ_a и число степеней свободы n

Код станции	a	σ_a	n	Код станции	a	σ_a	n
ESP	0.252	0.189	7	CGO	3.966	0.089	21
SIS	1.22	0.129	9	CYA	4.014	0.128	14
CFA	3.128	0.13	22	SPO	3.893	0.104	17
MAA	3.864	0.111	18	CRI	-0.929	0.493	9
MQA	3.998	0.084	22	MLO	1.049	0.075	21

Данные табл. 2 показывают, что изменение во времени среднегодовых значений содержания CO_2 на все станциях сходно с его изменением на станции ALT. Различие либо мало и недостоверно, как для станции ESP, или же определяется с высокой точностью. Исключение – станция CRI, находящаяся на территории Индии, хотя и для нее ситуация близка к общей. Таким образом, обнаруживается сходство изменения во времени среднегодовых значений для всех станций, а именно, их отличие «на константу». Для лучшей иллюстрации этого вывода на рис. 2 приведены изменения среднегодовых значений в двух вариантах: на панели а) приведены исходные значения, а на панели б) – с поправками, приведенными в табл. 2. Видно, что после прибавления поправок линии практически совпали. Несколько аномальны лишь данные со станции CRI, но отклонения незначительны.

Далее, для каждого месяца календарного года и каждого года, для которого имеются среднемесячные данные за все 12 месяцев, вычислялось отклонение среднемесячного значения от среднегодового. Затем, для этих отклонений вычислялось среднее арифметическое по всем годам, по которым были данные за 12 месяцев. Результат этих вычислений – оценка внутригодового хода среднемесячных значений в том понимании, что здесь сформулировано. Результаты этих вычислений приведены на рис. 3 отдельно для трех северных станций (ALT, ESP, SIS) и пяти южных (SPO, MAA, CYA, MQA, CGO), расположенных в умеренных и полярных широтах.

Для большей выразительности на рис. 3 значения внутригодового хода нормированы на максимальное по модулю значение.

На рис. 3 видно, что в пределах групп внутригодовой ход среднемесячных значений уровня CO_2 сходен. Однако между группами наблюдается существенное различие. Если в северной группе положительные отклонения от среднегодового значения (панель а) наблюдаются в холодное время года (январь-июнь и ноябрь-декабрь), то в теплое время года, напротив, наблюдаются отрицательные отклонения. В южной группе такие закономерности

отсутствуют. Судя по данным (панель б), отклонения среднемесячных значений от среднегодовых растут от месяца к месяцу в холодное время года (апрель-сентябрь). В начале года отклонения отрицательны и довольно стабильны, а в конце года – положительны и довольно стабильны.

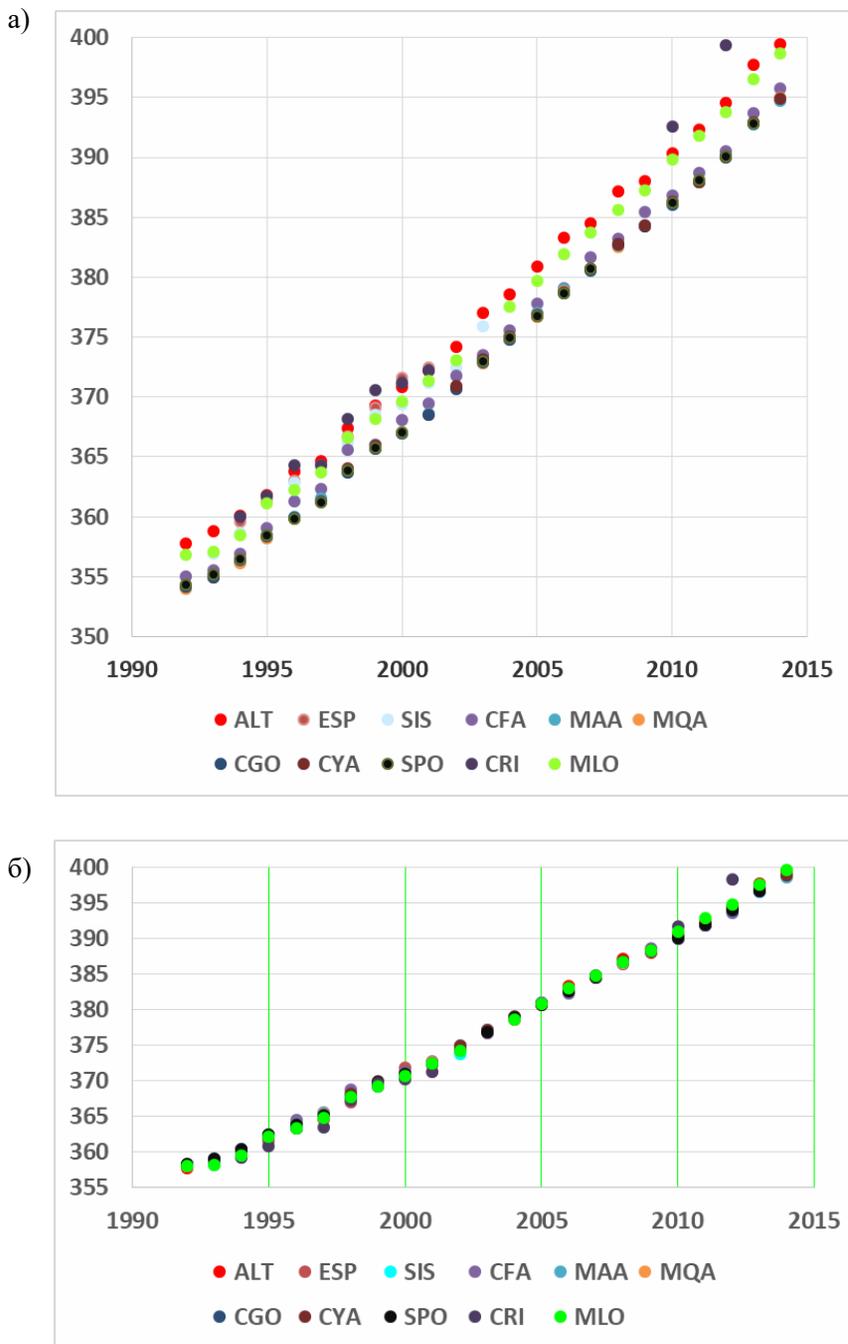


Рисунок 2. Изменения среднегодовых значений содержания CO₂:
панель а) - исходные значения, панель б) – с поправками, приведенными в табл. 2

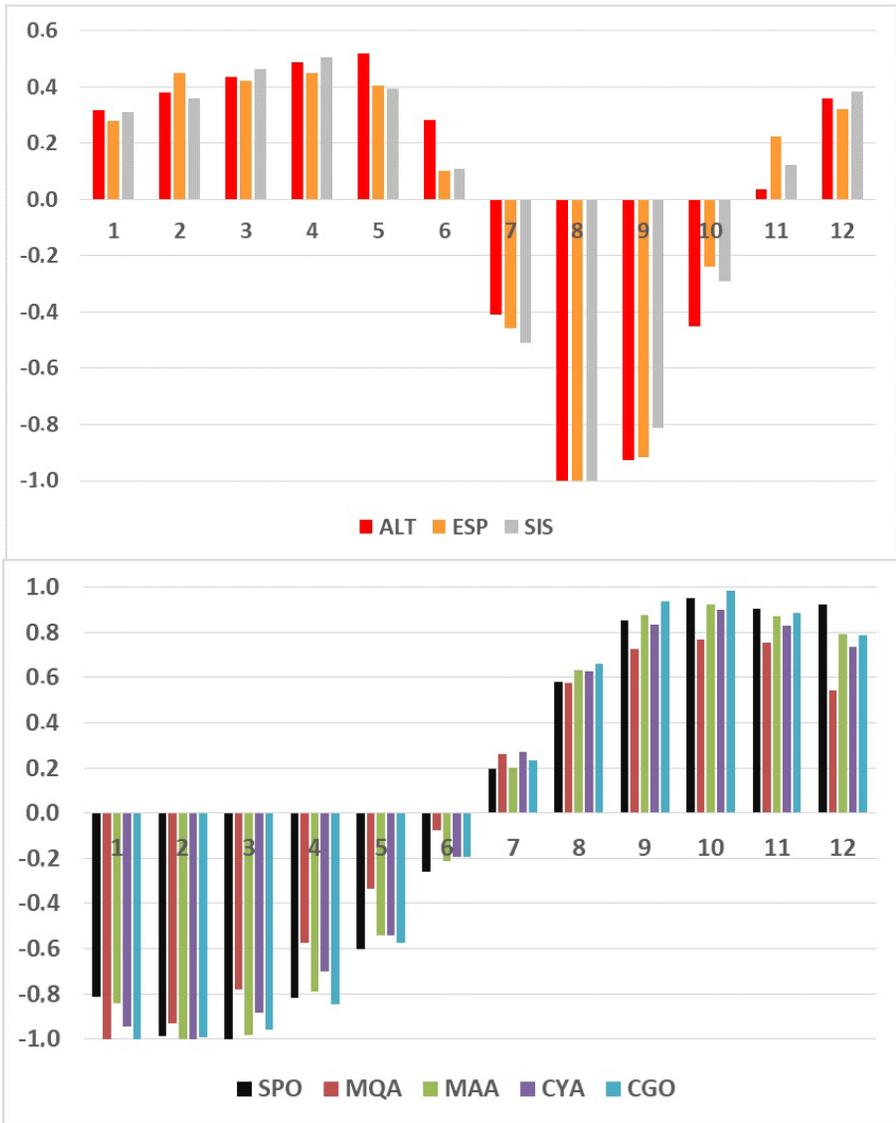


Рисунок 3. Внутригодовой ход среднемесячных значений содержания CO₂ по данным станций сети CSIRO, расположенных в умеренных и полярных широтах а) Северного полушария и б) Южного полушария; значения нормированы на максимальное по модулю.

И, наконец, аналогичная процедура с оставшимися тремя станциями не приводит к выявлению сходного внутригодового хода среднемесячных значений содержания CO₂. Однако, мы все же приведем на рис. 4 внутригодовой ход среднемесячных значений содержания CO₂, полученный при следующем преобразовании: данные по станции CRI сдвинуты циклически на 2 месяца вперед в пределах года, в по станции CFA – на 6. Как видно на рис. 4, сходство обнаруживается.

Последнее означает, что среднемесячные значения меняются относительно среднегодовых на этих трех станциях также сходно, но изменения на

станции CRI запаздывают по отношению к станции MLO на два месяца, а на станции CFA – на шесть.

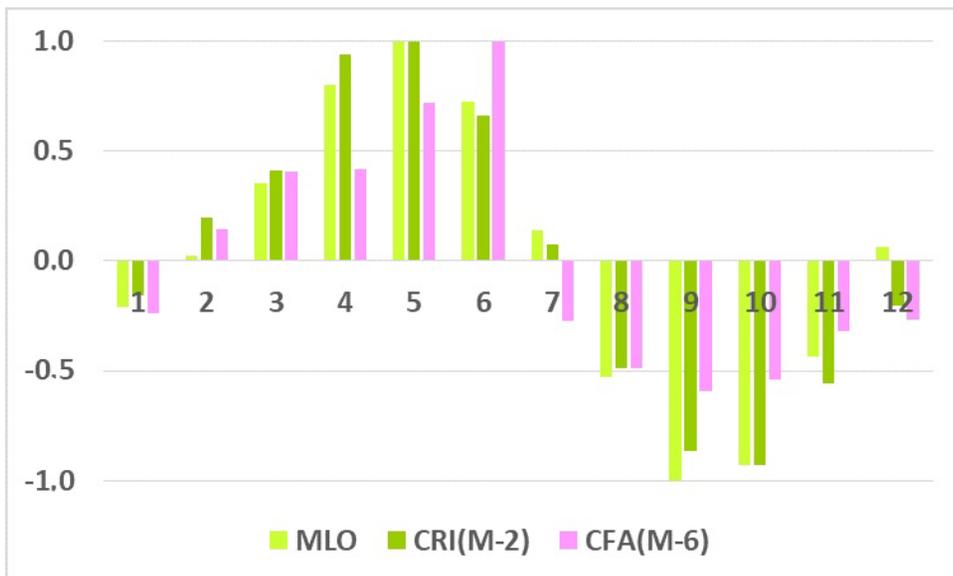


Рисунок 4. Внутригодовой ход среднемесячных значений содержания CO_2 по данным станций сети CSIRO, расположенных в тропических широтах; данные по станции CRI сдвинуты циклически на 2 месяца вперед, а по станции CFA – на 6.

Обсуждение

Объяснение особенностей описанных изменений уровня содержания CO_2 на различных станциях CSIRO, в том числе их сезонных сходства и различий, не входит в задачи этой статьи. Для этого нужно использовать модельный подход. Мы ограничимся лишь следующими краткими замечаниями по этому поводу.

Вопрос о том, почему уровни содержания CO_2 в приповерхностном слое атмосферы в среднем убывают с севера на юг, т.е. с уменьшением широты, обсуждается довольно давно. В работе (Taylor, Ott, 2000) делается вывод о том, что это не может быть объяснено естественными причинами. В работе (Keeling et al., 2005) прямо указывается на то, что большие уровни содержания CO_2 на севере – следствие большего антропогенного выброса углекислого газа в ходе хозяйственной деятельности в этих широтах. Зональное среднее этого выброса, по-видимому, имеет тенденцию к убыванию с широтой.

Особенности внутригодового хода содержания CO_2 на станциях северной группы можно отнести к воздействию двух факторов:

- в холодное время года антропогенный выброс CO_2 увеличен, в том числе за счет потребностей в обогреве помещений;
- в теплое время углекислый газ поглощается из атмосферы за счет фотосинтеза растений.

Рост содержания CO_2 в апреле-сентябре на станциях южной группы в таких простых терминах объяснить не удастся. В умеренных и полярных широтах Южного полушария это холодное время года, и океан должен скорее поглощать углекислый газ из атмосферы – см. (Володин, Пережогин, 2015). Конечно, из Северного полушария могут быть перенесены массы воздуха, но в этот период они скорее обеднены углекислым газом.

Благодарности

Автор благодарен И.А. Корневой за помощь в визуализации данных, а также признателен за поддержку, оказанную этой работе в рамках следующих проектов:

- Выполнение фундаментальных научных исследований (ГП 14) по теме "Решение фундаментальных проблем анализа и прогноза состояния климатической системы Земли" Программы Фундаментальных Научных Исследований государственных академий наук на 2013-2020 гг., раздел 9 "Науки о Земле", подраздел 135 "Физические и химические процессы в атмосфере, включая ионосферу и магнитосферу Земли, криосфере и на поверхности Земли, механизмы формирования и современные изменения климата, ландшафтов, оледенения и многолетнемерзлых грунтов";

- Исследование совместных изменений климатических норм и показателей изменчивости температуры в приповерхностном слое и их влияния на погодные экстремумы, воздействия и риски для экосистем и здоровья населения на территории России и соседних стран; Программа Президиума РАН № 51 "Изменение климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования";

- проект 1.3.3.2. Исследовать влияние изменения климата на потоки CO_2 через лесные и тундровые экосистемы на территории России; Программа научно-исследовательских, технологических и других работ Росгидромета для государственных нужд в области гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды.

Список литературы

Володин Е.М., Пережогин П.А. 2015. Расчет эволюции трехмерной концентрации атмосферного углекислого газа в климатической модели ИВМ РАН. – Труды Гидрометцентра России, вып. 357, с. 5-15.

Callendar G. S. 1938. The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature. - Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 64(275), pp. 223-240.

Francey R.J., Steele L.P., Langenfelds R.L., Lucarelli M.P., Allison C.E., Beardsmore D.J., Coram S.A., Derek N., de Silva F.R., Etheridge D.M., Fraser P.J., Henry R.J., Turner B., Welch E.D., Spencer D.A., Cooper L.N. 1996. Global Atmospheric Sampling Laboratory (GASLAB): supporting and extending the Cape

Grim trace gas programs. Baseline Atmospheric Program (Australia) 1993, edited by R.J. Francey, A.L. Dick and N. Derek, pp 8-29. – Bureau of Meteorology and CSIRO Division of Atmospheric Research, Melbourne, Australia.

Francey R.J., Steele L.P., Spencer D.A., Langenfelds R.L., Law R.M., Krummel P.B., Fraser P.J., Etheridge D.M., Derek N., Coram S.A., Cooper L.N., Allison C.E., Porter L., Baly S. 2003. The CSIRO (Australia) measurement of greenhouse gases in the global atmosphere. Report of the 11th 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, pp. 97-111.

Keeling C.D., Piper S.C., Bacatow R.B., Wahlen M., Whorf T.P., Heimann P. M., Meijer H.A. 2005. Atmospheric CO₂ and ¹³CO₂ exchange with the terrestrial biosphere and oceans from 1978 to 2000: observations and carbon cycle implications, pages 83-113, in "A History of Atmospheric CO₂ and its effects on Plants, Animals, and Ecosystems", editors, Ehleringer, J.R., T.E. Cerling, M.D. Dearing. – Springer Verlag, New York.

Taylor J.A., Orr J.C. 2000. The natural latitudinal distribution of atmospheric CO₂. – United States: N. p., Web. doi:10.2172/768563.

Статья поступила в редакцию: 08.04.2018 г.

После переработки: 14.04.2018 г.