

КАРБОНОВЫЕ ПОЛИГОНЫ ИОА СО РАН ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В АТМОСФЕРЕ. ЧАСТЬ II

В.В. Антонович¹, О.Ю. Антохина¹, П.Н. Антохин¹, В.Г. Аршинова¹, М.Ю. Аршинов¹, Б.Д. Белан¹, С.Б. Белан¹, Д.К. Давыдов¹, Г.А. Ивлев¹, А.В. Козлов¹, Ш.Ш. Максютлов², Т. Мачида², Д.А. Пестунов¹, И.В. Пташник¹, Т.М. Рассказчикова¹, Д.Е. Савкин¹, Сасакава², Д.В. Симоненков¹, Т.К. Складнева¹, Г.Н. Толмачев¹, А.В. Фофонов¹

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, РФ

²Национальный институту исследования окружающей среды, Тсукуба, Япония

E-mail: bbd@iao.ru

Во второй части работы дано описание сети станций мониторинга парниковых газов, созданной в Западной Сибири на территории Алтайского края, Омской, Томской, Тюменской и Челябинской областей, Ханты-Мансийского и Ямало-Ненецкого автономных округов. Приводятся некоторые результаты многолетнего мониторинга парниковых газов на территории Западной Сибири.

Ключевые слова: атмосфера, станция, парниковые газы.

Поступила в редакцию 24.08.2022. После доработки: 27.11.2022.

Введение. В первой части работы была описана мониторинговая система ИОА СО РАН по контролю за концентрацией парниковых газов, развернутая в Западной Сибири. Она состоит из 3 постов и 2 стационаров. Для такого обширного региона, как Западносибирский, который к тому же характеризуется значительным ландшафтным разнообразием, этого совершенно недостаточно. Для повышения репрезентативности наблюдательной сети необходимо было расширить территорию, охваченную регулярными измерениями. Это было выполнено при создании Российско-японской сети мониторинга парниковых газов JR-STATION. Она охватывает почти все территорию Западной Сибири и была создана в рамках международного российско-японского сотрудничества между Институтом оптики атмосферы им. В.Е. Зуева (ИАО СО РАН) и Национальным институтом исследований окружающей среды (NIES, г. Цукуба, Япония).

Описание сети. Отбор проб воздуха ведется, как правило, с двух высотных

уровней, причем верхний ограничен фактической высотой мачты, а нижний всегда располагается над верхним срезом окружающей древесной растительности (от 15 до 40 м). По системе труб и переключающих клапанов воздух, предварительно осушенный, непрерывно подается к газоанализаторам согласно установленному графику. Измерения концентраций проводятся ежечасно для каждого из высотных уровней, а два раза в сутки производится процедура калибровки по трем ПГС. В целях экономии дорогостоящих «стандартов» также осуществляется ежечасная калибровка по опорной газовой смеси, которая периодически закачивается в 2 баллона из окружающей атмосферы, представляя, таким образом, дополнительный возобновляемый «стандарт».

Схема расположения станций по территории Западной Сибири и внешний вид используемых для измерений башен показан на рис. 1. Все посты оснащены однотипным оборудованием. Координаты и технические характеристики его показаны в табл. 1, 2.

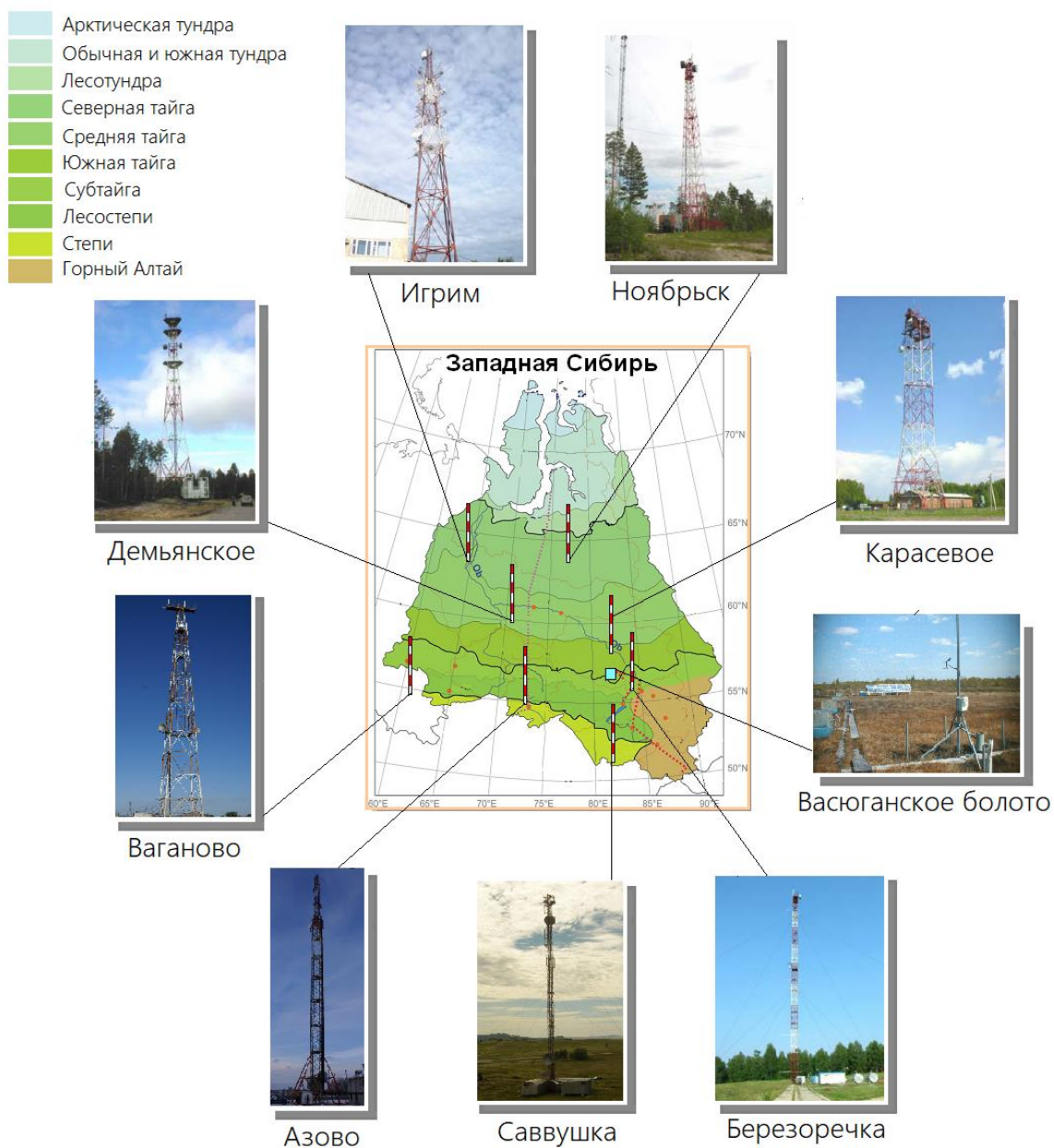


Рис.1. Расположение постов парниковых газов на территории Западной Сибири
Fig. 1. Location of greenhouse gas stations in Western Siberia

Таблица 1. Координаты постов Российской-японской сети JR-STATION

Пункт	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	Высота, м н.у.м.	Высота уровней отбора проб, м	Начало ряда
Березоречка, Томская обл.	56°08'48"	84°19'50"	150	5, 20, 40, 80	2002
Карасево, Томская обл.	58°14'47"	82°25'16"	50	35, 67	2004
Игрим, ХМАО	63°11'30"	64°24'48"	25	24, 47	2004-2013

Продолжение таблицы 1

Пункт	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	Высота, м н.у.м.	Высота уровней отбора проб, м	Начало ряда
Демьянское, Тюменская обл.	59°4'31"	70°52'15"	75	45, 63	2006
Ноябрьск, ЯНАО	63°26'28"	75°46'22"	100	21, 43	2006
Саввушка, Алтайский край	51°19'49"	82°07'67"	400	27, 52	2006-2014
Азово, Ом- ская обл.	54°42'19"	73°01'45"	100	29, 50	2007
Ваганово, Челябинская обл.	54°29'50"	62°19'29"	200	42, 85	2008

Таблица 2 Технические характеристики станций сети JR-STATION

Блок	Прибор/датчик	Измеряемый параметр	Диапазон	Погрешность
Метеоблок	Vaisala HMP45D	t, °C U, %	-40...+60 0...100	±0,2 °C ±2%
	Young Model 05103	dd, град V, м/с	0...360 0...60	±3° ±0,3 м/с
	Young Model 52202	Интенсивность и количество осадков	0...50 мм/ч	±2% (<25 мм/ч), ±3% (>25 мм/ч)
	Omega PX2760	P, гПа	800...1100	±0.25%
Блок газо- анализа	LI-COR LI-820	CO ₂ , млн ⁻¹	0...1000	< 0,2* млн ⁻¹
	Модифицированный датчик Figaro TGS- 2611	CH ₄ , млн ⁻¹	1...10	< 0,007* млн ⁻¹
	Picarro G2301**	CO ₂ , млн ⁻¹ CH ₄ , млн ⁻¹ H ₂ O, млн ⁻¹	0...1000 0...20 0...70000	< 0,07 млн ⁻¹ <0,0005 млн ⁻¹ < 80 млн ⁻¹
	Picarro G2401***	CO ₂ , млн ⁻¹ CH ₄ , млн ⁻¹ CO, млн ⁻¹ H ₂ O, млн ⁻¹	0...1000 0...20 0...1 0...70000	< 0,05 млн ⁻¹ <0,001 млн ⁻¹ <0,015 млн ⁻¹ < 30 млн ⁻¹
Радиацион- ный блок	Kipp&Zonen CM3	λ, мкм Q, Вт/м ²	0,305...2,8 0...2000	< ± 2%
	Kipp&Zonen PQS1	λ, мкм ФАР, мкмоль м ⁻² с ⁻¹	0,4...0,7	< ± 2%

* при калибровке поверочными газовыми смесями (ПГС)

** на станциях Демьянское и Ноябрьск (с 2016 г.)

*** на станции Карасевое (с 2015 г.)

Комплекс для исследования потоков парниковых газов на границе почва-атмосфера (Васюганское болото). Две измерительные площадки расположены на Иксинском болоте, представляющем собой северо-восточный отрог Большого Васюганского болота. Примерно в 16 км от с. Плотниково Бакчарского района Томской области, на стационаре Института почвоведения и агрохимии СО РАН (56°51'29" N, 82°50'91" E). Площадка 1 в грядово-мочажинном комплексе нетронутого болота. Площадка 2 находится на краю нарушенного (мелиорированного в советское время) болота. На обеих площадках были установлены одинаковые измерительные комплексы. В 2009 году

комплекс на площадке 2 был уничтожен и восстановлен в 2019 году.

Измерительный комплекс на Васюганском болоте (рис. 2) состоит из 12 автоматических камер, установленных на различных растительных сообществах болотной экосистемы. Его технические характеристики приведены в табл. 3. В составе растительного покрова на обеих площадках присутствуют низкорослые сосны (*Pinus sylvestris f. willkommii*) высотой 50 см. Травяно-кустарничковый ярус представлен багульником (*Ledum palustre L.*) и кочками пушицы (*Eriophorum vaginatum Lu*), встречается клюква (*Oxycoccus microcarpus Turcz.*). Моховой покров сплошной, состоит в основном из *Sphagnum fuscum Klinggr.* и *Sph. angustifolium C. Jens.*



Рис. 2. Измерительный комплекс, расположенный на Васюганском болоте
Fig. 2. Measuring complex located on the Vasyugan swamp

Таблица 3. Технические характеристики комплексов оборудования для измерения потоков CH₄ и CO₂, установленного на двух площадках Иксинского болота

Блок	Прибор/датчик	Измеряемый параметр	Диапазон	Погрешность
Метеоблок	Vaisala HMP45A	t, °C U, %	-40...+60 0...100	±0,2 °C ±2%
	Young Model 05103	dd, град V, м/с	0...360 0...60	±3° ±0,3 м/с
	Young Model 52202	Интенсивность и количество осадков	0...50 мм/ч	±2% (<25 мм/ч), ±3% (>25 мм/ч)

	Omega PX2760	P, гПа	800...1100	±0.25%
	HOBO U20-001-04 (10 шт.)	Уровень воды, м	0...4	±0,03
	Dallas DS1921L-F50	t почвы, °C	-40...+85	±1,0 °C
Блок газо-анализа	LI-COR LI-820	CO ₂ , млн ⁻¹	0...1000	< 0,2* млн ⁻¹
	Модифицированный датчик Figaro TGS-2611	CH ₄ , млн ⁻¹	1...10	< 0,007* млн ⁻¹
Радиационный блок	Kipp&Zonen CMP-21	λ, мкм Q, Вт/м ²	0,285...2,8 0...4000	< ± 2%
	Kipp&Zonen PQS1	λ, мкм ФАР, мкмоль м ⁻² с ⁻¹	0,4...0,7	< ± 2%
	Eppley Lab. PIR	λ, мкм IR, Вт/м ²	3,5...50 0...700	< ± 3%

* при калибровке поверочными газовыми смесями (ПГС).

Процесс измерения полностью автоматизирован и не требует постоянного вмешательства оператора, что в свою очередь снижает влияние человека, на измерения увеличивая тем самым воспроизводимость результатов и уменьшая погрешность измерений. Результаты работ были опубликованы в [1–13]

Основные результаты мониторинга парниковых газов. Проведенный мониторинг показывает, что на всей территории Западной Сибири наблюдается устойчивый рост концентрации CO₂ и CH₄ и он значительно выше над южными районами. Это хорошо видно из рис. 3, 4.

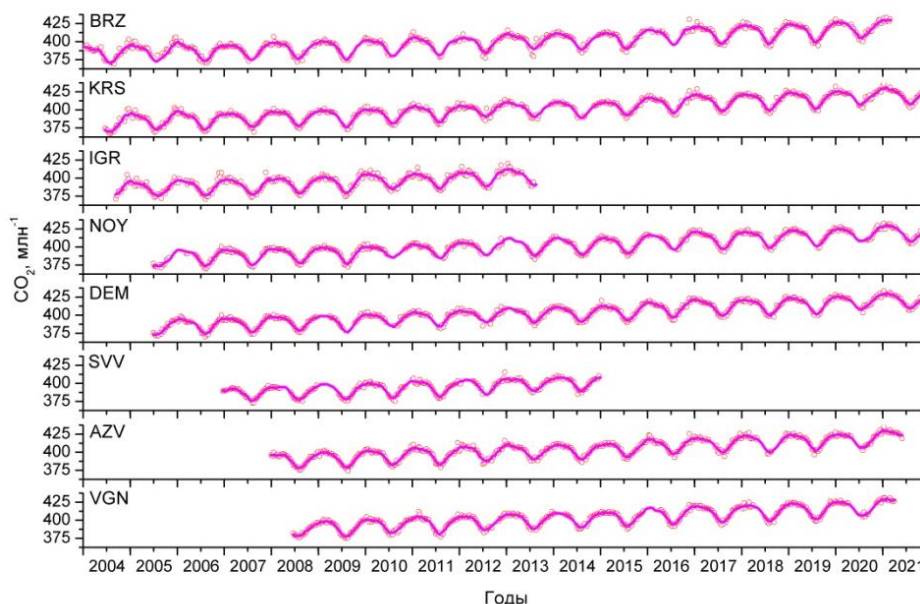


Рис. 3. Многолетний сглаженный ход среднедекадных концентраций углекислого газа в пунктах сети мониторинга на территории Западной Сибири

Fig. 3. Long-term smoothed course of average ten-day concentrations of carbon dioxide at monitoring network points in Western Siberia

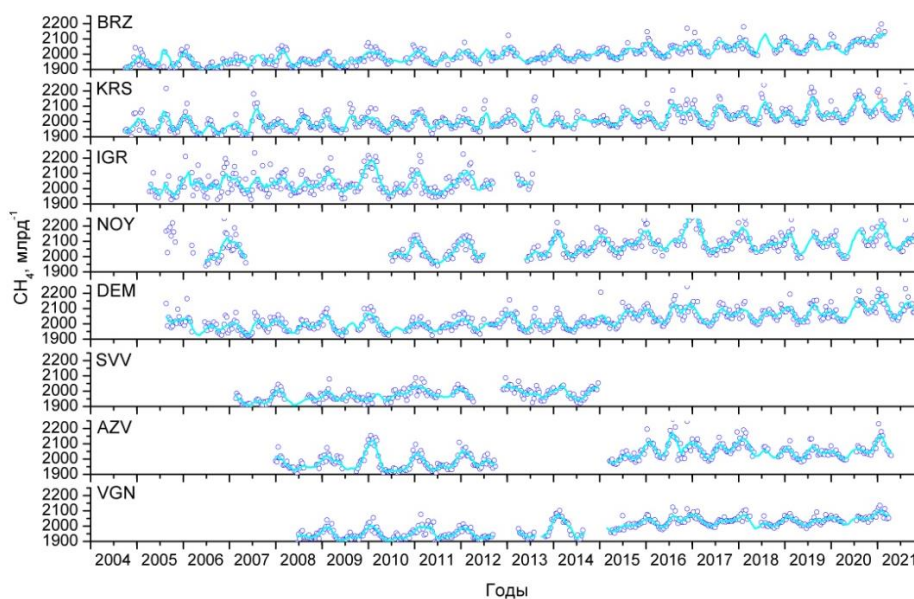


Рис. 4. Многолетний сглаженный ход среднедекадных концентраций метана в пунктах сети мониторинга на территории Западной Сибири

Fig. 4. Long-term smoothed course of mean ten-day methane concentrations at monitoring network points in Western Siberia

Среднее увеличение концентрации углекислого газа в приземной атмосфере по результатам наших измерений и данным из других источников колеблется в пределах $2,2\text{--}2,44$ млн⁻¹ в год (рис. 3). Следует также отметить высокую изменчивость атмосферного содержания CO₂ в вегетационный период года, когда наблюдается суточное дыхание растительности на подстилающей поверхности, что приводит к увеличению СКО измеряемых значений. Напротив, в холодное время высокие концентрации CO₂ в приземной атмосфере варьируются незначительно, за исключением всплеска в начале зимнего отопительного сезона.

В работе [14] отмечается, что глобальные средние концентрации CH₄ увеличивались почти постоянно, начиная с доиндустриальной эпохи до конца XX века. Далее поведение метана стало менее определенным. Между 1990 и 2006 годами наблюдалось общее небольшое снижение глобальных концентраций с повышенной межгодовой изменчиво-

стью – от $+16,5 \pm 0,9$ млрд⁻¹/год в 1991 году, до $-3,8 \pm 1,2$ млрд⁻¹/год в 2004 году. Однако, по последним наблюдениям, начиная с 2007 года, неустойчивое состояние метана сменилось ростом его содержания в атмосфере. Возможные объяснения подобного процесса включают гипотезы: изменения в глобальных концентраций ОН, основного атмосферного стока CH₄; и изменения в эмиссии от таких источников метана, как возделывание риса, болот, сжигание биомассы и ископаемого топлива.

Вышеописанные тенденции в межгодовом поведении метана обнаружены и на сети мониторинга в Западной Сибири (рис. 4). В целом, анализ многолетних данных свидетельствует о наличии роста атмосферных концентраций CH₄ в пределах $6\text{--}11$ млрд⁻¹ в год. Отметим также, что в отличие от CO₂ метан показывает наибольшую изменчивость (увеличенные СКО измеряемых значений) в летние и зимние максимумы наблюдаемых концентраций.

Среднегодовые концентрации CO₂ и CH₄, измеряемые обсерваториями ESRL NOAA на горе Мауна Лоа (MLO; 19°32'с.ш.; 155°35' з.д.; Гавайи, США) и мысе Барроу (BRW; 71°19' с.ш.; 156°37' з.д.; Аляска, США) [15, 16] ниже полученных нами, что объясняется не только их географическим расположением в океанической зоне, но и значительной высотой первого пункта (3397 м н.у.м.). Последнее обстоятельство позволяет отнести условия наблюдений обсерватории Мауна Лоа к проводимым вблизи планетарного пограничного слоя Земли, где изменения в поведении малых газовых составляющих атмосферы значительно сглажены.

Заключение. Для проведения мониторинга состава воздуха на территории Западной Сибири было создано 3 поста комплексного мониторинга, 8 постов контроля концентрации парниковых газов и 2 стационара измерения потоков парниковых газов на границе почва-атмосфера.

Проведенный с их помощью многолетний мониторинг показал, что, в зависимости от района увеличение концентрации углекислого газа в приземном слое воздуха составляет 2,17–2,44 млн⁻¹ в год, рост содержания метана – 6–11 млрд⁻¹ в год. Это превышает средние темпы роста содержания этих газов по планете [17].

Наименьшая изменчивость характерна для N₂O. В среднем рост концентрации происходит со скоростью 0,80 млрд⁻¹ /год, что соответствует среднему тренду по планете [17].

Работа выполнена в рамках госзадания ИОА СО РАН, проект ВИП ГЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Barkley M.P., Monks P.S., Hewitt A.J., Machida T., Desai A., Vinnichenko N., Nakazawa T., Arshinov M.Yu., Fedoseev N., Watai T.* Assessing the near surface sensitivity of SCIAMACHY atmospheric CO₂ retrieved using (FSI) WFM-DOAS // *Atmos. Chem. Phys.*, 2007, Vol. 7, N 13, P. 3597–3619.

2. *Sasakawa M., Shimoyama K., Machida T., Tsuda N., Suto H., Arshinov M., Davidov D., Fofonov A., Krasnov O., Saeki T., Koyama Y., Maksyutov S.* Continuous Measurement of Methane Concentration using 9-tower Network over Siberia // *Tellus B.* 2010. Vol. 62. № 5. P. 403–416.

3. *Watai T., Machida T., Shimoyama K., Krasnov O., Yamamoto M., Inoue G.* Development of an Atmospheric Carbon Dioxide Standard Gas Saving System and Its Application to a Measurement at a Site in the West Siberian Forest // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.* 2010. Vol. 27. № 5. P. 843–855.

4. *Machida T., Sasakawa M., Shimoyama K., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Krasnov O., Fedoseev N., Tsuda N., Mitin S., Suto H., Katsumata K., Tsuda N., Nakazawa T., Maksyutov S.* Temporal and spatial distributions of atmospheric greenhouse gases over Siberia (на японском языке) // *Low Temperature Science.* 2010. Vol. 68. P. 9–19.

5. *Sasakawa M., Ito A., Machida T., Tsuda N., Niwa Y., Davydov D., Fofonov A., Arshinov M.* Annual variation of methane emissions from forested bogs in West Siberia (2005–2009): a case of high CH₄ and precipitation rate in the summer of 2007 // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2010. Vol. 10. N 11. P. 27759–27776.

6. *Аришинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Креков Г.М., Фофанов А.В., Бабченко С.В., Иноуэ Г., Махиды Т., Максютов Ш., Сасакава М., Шимойама К.* Динамика вертикального распределения парниковых газов в атмосфере // *Оптика атмосферы и океана.* 2012. Т. 25. № 12. С. 1051–1061.

7. *Sasakawa M., Ito A., Machida T., Tsuda N., Niwa Y., Davydov D., Fofonov A., and Arshinov M.* Annual variation of CH₄ emissions from the middle taiga in West Siberian Lowland (2005–2009): a case of high CH₄ flux and precipitation rate in the summer of 2007 // *Tellus B.* 2012. Vol. 64. 17514. DOI: 10.3402/tellusb.v64i0.17514.

8. *Saeki T., Maksyutov S., M. Sasakawa, Machida T., Arshinov M., Tans P., Conway T. J., Saito M., Valsala V., Oda T., Andres R. J., Belikov D.* Carbon flux estimation for Siberia by inverse modeling

constrained by aircraft and tower CO₂ measurements // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2013. Vol. 118. Is. 2. P. 1100–1122. DOI: 10.1002/jgrd.50127.

9. *Sasakawa M., Machida T., Tsuda N., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Krasnov O.* Aircraft and tower measurements of CO₂ concentration in the planetary boundary layer and the lower free troposphere over southern taiga in West Siberia: Long-term records from 2002 to 2011 // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2013. Vol. 118. Is. 16. P. 9489–9498. DOI: 10.1002/jgrd.50755.

10. *Berchet A., Pison I., Chevallier F., Paris J.-D., Bousquet P., Bonne J.-L., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Cressot C., Davydov D.K., Dlugokencky E.J., Fofonov A.V., Galanin A., Lavrič J., Machida T., Parker R., Sasakawa M., Spahni R., Stocker B.D., Winderlich J.* Natural and anthropogenic methane fluxes in Eurasia: a meso-scale quantification by generalized atmospheric inversion // *Biogeosciences*. 2015. Vol. 12. N 18. P. 5393–5414.

11. *Ono A., Hayashida S., Sugita T., Machida T., Sasakawa M., and Arshinov M.* Comparison of GOSAT SWIR and aircraft measurements of XCH₄ over West Siberia // *Scientific Online Letters on the Atmosphere*. 2015. Vol. 11. № 12. P. 160–164.

12. *Kim J., Kim H.M., Cho C.-H., Boo K.-O., Jacobson A.R., Sasakawa M., Machida T., Arshinov M., and Fedoseev N.*

Impact of Siberian observations on the optimization of surface CO₂ flux, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* DOI:10.5194/acp-2015-875, in review, 2016.

13. *Sasakawa M., Machida T., Ishijima K., Arshinov M., Patra P.K., Ito A., Aoki S., Petrov V.* Temporal characteristics of CH₄ vertical profiles observed in the West Siberian Lowland over Surgut from 1993 to 2015 and Novosibirsk from 1997 to 2015 // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2017. Vol. 122. N 20. P. 11261–11273.

14. *Belikov D., Arshinov M., Belan B., Davydov D., Fofonov A., Sasakawa Motoki, Machida Toshinobu.* Analysis of the diurnal, weekly, and seasonal cycles and annual trends in atmospheric CO₂ and CH₄ at tower network in Siberia during 2005–2016 // *Atmosphere*. 2019. Vol. 10. N 11. 689; <https://doi.org/10.3390/atmos10110689>.

15. *O'Shea S.J., Bauguutte S.J.-B., Gallagher M.W., Lowry D., Percival C.J.* Development of a cavity-enhanced absorption spectrometer for airborne measurements of CH₄ and CO₂ // *Atmos. Meas. Tech.* 2013. № 6. P. 1095–1109. DOI:10.5194/atm-6-1095-2013.

16. URL: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd>.

17. WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 17. 25 October 2021. 8 p.

CARBONIC POLYGONS OF THE IOA SB RAS FOR STUDYING THE DYNAMICS OF GREENHOUSE GASES IN THE ATMOSPHERE. 2 PART

V.V. Antonovich¹, O.Yu. Antokhina¹, P.N. Antokhin¹, V.G. Arshinova¹, M.Yu. Arshinov¹, B.D. Belan¹, S.B. Belan¹, D.K. Davydov¹, G.A. Ivlev¹, A.V. Kozlov¹, Sh.Sh. Maksyutov², T. Machida², D.A. Pestunov¹, I.V. Ptashnik¹, T.M. Rasskazchikova¹, D.E. Savkin¹, Sasakawa², D.V. Simonenkov¹, T.K. Sklyadneva¹, G.N. Tolmachev¹, A.V. Fofonov¹

¹Institute of Atmospheric Optics named after V.E. Zuev, SB of RAS, Tomsk, RF

²National Institute for Environmental Research, Tsukuba, Japan

The second part of the paper describes the network of greenhouse gas monitoring stations, set up in Western Siberia on the territory of the Altai Territory, Omsk, Tomsk, Tyumen and Chelyabinsk regions, Khanty-Mansiysk and Yamalo-Nenets Autonomous Districts. Some results of long-term monitoring of greenhouse gases in Western Siberia are presented.

Keywords: atmosphere, station, greenhouse gases.

REFERENCES

1. Barkley M.P., Monks P.S., Hewitt A.J., Machida T., Desai A., Vinnichenko N., Nakazawa T., Arshinov M.Yu., Fedoseev N., Watai T. Assessing the near surface sensitivity of SCIAMACHY atmospheric CO₂ retrieved using (FSI) WFM-DOAS // *Atmos. Chem. Phys.*, 2007, Vol. 7, N 13, P. 3597–3619.
2. Sasakawa M., Shimoyama K., Machida T., Tsuda N., Suto H., Arshinov M., Davidov D., Fofonov A., Krasnov O., Saeki T., Koyama Y., Maksyutov S. Continuous Measurement of Methane Concentration using 9-tower Network over Siberia // *Tellus B*. 2010. Vol. 62. № 5. P. 403–416.
3. Watai T., Machida T., Shimoyama K., Krasnov O., Yamamoto M., Inoue G. Development of an Atmospheric Carbon Dioxide Standard Gas Saving System and Its Application to a Measurement at a Site in the West Siberian Forest // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2010. Vol. 27. № 5. P. 843–855.
4. Machida T., Sasakawa M., Shimoyama K., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Krasnov O., Fedoseev N., Tsuda N., Mitin S., Suto H., Katsumata K., Tsuda N., Nakazawa T., Maksyutov S. Temporal and spatial distributions of atmospheric greenhouse gases over Siberia (на японском языке) // *Low Temperature Science*. 2010. Vol. 68. P. 9–19.
5. Sasakawa M., Ito A., Machida T., Tsuda N., Niwa Y., Davydov D., Fofonov A., Arshinov M. Annual variation of methane emissions from forested bogs in West Siberia (2005–2009): a case of high CH₄ and precipitation rate in the summer of 2007 // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2010. Vol. 10. N 11. P. 27759–27776.
6. Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K., Krekov G.M., Fofonov A.V., Babchenko S.V., Inoue G., Machida T., Maksutov Sh., and Sasakaw. Dinamika vertikal'nogo raspredeleniya parnikovyh gazov v atmosfere (Dynamics of the vertical distribution of greenhouse gases in the atmosphere). *Atmospheric and oceanic optics*. 2012, Vol. 25, No. 12, pp. 1051–1061.
7. Sasakawa M., Ito A., Machida T., Tsuda N., Niwa Y., Davydov D., Fofonov A., and Arshinov M. Annual variation of CH₄ emissions from the middle taiga in West Siberian Lowland (2005–2009): a case of high CH₄ flux and precipitation rate in the summer of 2007 // *Tellus B*. 2012. Vol. 64. 17514. DOI: 10.3402/tellusb.v64i0.17514.
8. Saeki T., Maksyutov S., M. Sasakawa, Machida T., Arshinov M., Tans P., Conway T. J., Saito M., Valsala V., Oda T., Andres R. J., Belikov D. Carbon flux estimation for Siberia by inverse modeling constrained by aircraft and tower CO₂ measurements // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2013. Vol. 118. Is. 2. P. 1100–1122. DOI: 10.1002/jgrd.50127.
9. Sasakawa M., Machida T., Tsuda N., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Krasnov O. Aircraft and tower measurements of CO₂ concentration in the planetary boundary layer and the lower free troposphere over southern taiga in West Siberia: Long-term records from 2002 to 2011 // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2013. Vol. 118. Is. 16. P. 9489–9498. DOI: 10.1002/jgrd.50755.
10. Berchet A., Pison I., Chevallier F., Paris J.-D., Bousquet P., Bonne J.-L., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Cressot C., Davydov D.K., Dlugokencky E.J., Fofonov A.V., Galanin A., Lavrič J., Machida T., Parker R., Sasakawa M., Spahni R., Stocker B.D., Winderlich J. Natural and anthropogenic methane fluxes in Eurasia: a meso-scale quantification by generalized atmospheric inversion // *Biogeosciences*. 2015. Vol. 12. N 18. P. 5393–5414.
11. Ono A., Hayashida S., Sugita T., Machida T., Sasakawa M., and Arshinov M. Comparison of GOSAT SWIR and aircraft measurements of XCH₄ over West Siberia // *Scientific Online Letters on the Atmosphere*. 2015. Vol. 11. № 12. P. 160–164.
12. Kim J., Kim H. M., Cho C.-H., Boo K.-O., Jacobson A. R., Sasakawa M., Machida T., Arshinov M., and Fedoseev N. Impact of Siberian observations on the optimization of surface CO₂ flux, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* DOI:10.5194/acp-2015-875, in review, 2016.
13. Sasakawa M., Machida T., Ishijima K., Arshinov M., Patra P. K., Ito A., Aoki S., Petrov V. Temporal characteristics of CH₄ vertical profiles observed in the West Siberian Lowland over Surgut from 1993 to 2015 and Novosibirsk from 1997 to 2015 // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2017. Vol. 122. N 20. P. 11261–11273.
14. Belikov D., Arshinov M., Belan B., Davydov D., Fofonov A. Sasakawa Motoki, Machida Toshinobu. Analysis of the diurnal, weekly, and seasonal cycles and annual trends in atmospheric CO₂ and CH₄ at tower network in Siberia during 2005–2016 // *Atmosphere*. 2019. Vol. 10. N 11. 689; <https://doi.org/10.3390/atmos10110689>.
15. O'Shea S.J., Bauguitte S.J.-B., Gallagher M.W., Lowry D., Percival C.J. Development of a cavity-enhanced absorption spectrometer for airborne measurements of CH₄ and CO₂ // *Atmos. Meas. Tech.* 2013. № 6. P. 1095–1109. DOI:10.5194/atm-6-1095-2013.
16. URL:<http://www.esrl.noaa.gov/gmd>.
17. WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 17. 25 October 2021. 8 p.