



ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

и школа молодых ученых по измерениям, моделированию
и информационным системам для изучения окружающей среды

enviromis 2016

INTERNATIONAL CONFERENCE

and Early Career Scientists School
on Environmental Observations, Modeling and Information Systems

SELECTED PAPERS



ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА И МЕТАНА В ГЛОБАЛЬНОМ И РЕГИОНАЛЬНОМ (СИБИРЬ) МАСШТАБАХ: ОБЗОР

¹Беликов Д.А., ²Максютов Ш.М., ¹Старченко А.В.

¹Томский государственный университет, Томск, Россия

²Национальный институт экологических исследований, Цукуба, Япония

E-mail: dmitry.belikov@nies.go.jp; shamil@nies.go.jp; starch@math.tsu.ru

Глобальное потепление является одной из важнейших проблем современности, которая вызвана усилением парникового эффекта атмосферы. Концентрации основных парниковых газов (углекислого газа и метана) со времен начала научно-технической революции в 1850-х выросли на 31 % и 149 % соответственно, что обусловлено, прежде всего, антропогенным влиянием. В тоже время, углекислый газ и метан играют ключевую роль в геохимическом цикле углерода, объединяющем комплекс процессов, в ходе которых происходит перенос углерода между различными геохимическими резервуарами - оболочками Земли. Геохимический цикл углерода всегда происходит через атмосферу и гидросферу, поэтому влияет на окружающую среду и биосферу. Изменения цикла углерода играли и продолжают играть ключевую роль в эволюции на Земле, поэтому изучение углеродного цикла является актуальной научной задачей. В работе представлен обзор современных методов исследования эмиссии и стоков основных парниковых газов (оксида углерода, метана), а также углеродного цикла.

Натурные измерения являются основным источником данных о концентрациях парниковых газов и других параметрах экосистем. В последние десятилетия плотность сети станций, созданных для мониторинга парниковых газов в атмосфере, была увеличена. Измерения на борту судов и самолетов становятся доступными. Появляются специализированные спутники для мониторинга из космоса. Растущие объемы данных обеспечивают огромный потенциал для численного анализа, прямого и обратного моделирования. Оптимальное применение больших массивов данных наблюдений требует применения более сложных математических моделей, более точных и производительных вычислений.

Для оценки пространственного и временного распределения источников и стоков углерода, используются методы обратного моделирования, которые способны рассчитать потоки углерода, используя географически разреженные измерения концентраций парниковых газов (CO₂, CH₄) в атмосфере. Первые успешные попытки обратного моделирования углекислого газа в атмосфере были предприняты в конце 1980-х и начале 1990-х. Развитие вычислительной техники и численных методов позволило значительно усовершенствовать методологию. Однако, несмотря на прогресс, недавние исследования показали необходимость дальнейшего уточнения.

В Сибири сосредоточены значительные запасы растительной биомассы и почвенного органического углерода, что делает этот регион одним из крупнейших хранилищ углерода в мире. Точные оценки потоков углерода в Сибири крайне важны для понимания глобальных и региональных циклов углерода, а также для прогнозирования будущих изменений в Сибирском углеродном цикле. Предсказано, что будущее потепление в высоких широтах позволит высвободить дополнительные объемы CO₂ из сибирской вечной мерзлоты, что обеспечит положительную обратную связь на изменение климата. Сибирский регион характеризуется обширностью и труднодоступностью территорий, многообразием ландшафтов и слабой изученностью. Это определяет особенности исследования парниковых газов в Сибири.

A STUDY OF CARBON DIOXIDE AND METHANE IN THE GLOBAL AND REGIONAL (SIBERIA) SCALES: AN OVERVIEW

¹Belikov D.A., ²Maksyutov S., ¹Starchenko A.

¹Tomsk State University, Tomsk, Russia

²National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan

E-mail: dmitry.belikov@nies.go.jp; shamil@nies.go.jp; starch@math.tsu.ru

Global warming is one of the most important problems of our time, which is caused by enhanced atmospheric greenhouse effect. Since the beginning of the technological revolution in 1850 concentrations of the main greenhouse gases (carbon dioxide and methane) are increased by 31% and 149% respectively primarily due to anthropogenic influence. Carbon dioxide and methane play a crucial role in the geochemical carbon cycle con-

necting a complex processes in which carbon is transferred between different geochemical reservoirs - shells of the Earth. Geochemical carbon cycle always occurs through the atmosphere and hydrosphere, so it impacts on the environment and biosphere. Changes in the carbon cycle have been playing a key role in the evolution of the world. Therefore the study of the carbon cycle is the actual scientific task (IPCC, 2014). This work presents an overview of modern methods to study the emission and sink of greenhouse gases (carbon dioxide and methane), and therefore the carbon cycle.

Many studies have used “bottom-up” or “top-down” approaches to accurately estimate current carbon fluxes. “Bottom-up” approaches include direct flux measurement and process-based ecosystem modeling. Flux observations are usually made by a static chamber method (Glagolev et. al., 2011) or eddy covariance measurements (Papale et. al., 2006). Substantial progress in estimating the sources and sinks has been made through combining local observations of emissions with land unit inventories, satellite data or other relevant statistical information.

However, sites, networks, and opportunities for direct observations are still sparse owing to physical and logistical limitations. A number of studies using both analyses of available observed data and numerical modeling have been carried out (e.g. Slater and Lawrence, 2013). Various numerical modelling schemes have been developed to treat physical and biogeochemical processes on and below the land surface. Some of these processes are site-specific or process-oriented, while others are implemented as components of atmosphere–ocean coupled global climate models (AOGCMs), or Earth system models (ESMs) to interact with the overlying atmosphere. Among these processes, snowpack, ground freezing/thawing, and carbon exchange are the most relevant and important processes in terrestrial process models.

A “top-down” approach is inverse modeling using atmospheric transport models and atmospheric greenhouse gases observations. To estimate the spatial and temporal distribution of carbon sources and sinks, inverse methods are used to infer carbon fluxes from geographically sparse observations of the atmospheric greenhouses gases mixing ratio (Tans et al., 1989). The first comprehensive efforts in atmospheric inversions date back to the late 1980s and early 1990s (Enting and Mansbridge, 1989). With the increase in spatial coverage of observations and the development of three-dimensional (3-D) tracer transport models, a variety of numerical experiments and projects have been performed by members of the so-called “TransCom” community of inverse modelers (e.g., Denning et al., 1999; Gurney et al., 2002). A number of studies have proposed improvements to the inverse methods of atmospheric transport, i.e. the efficient computation of the transport matrix by the model adjoint, use of monthly mean GLOBALVIEW ground-based data, development of an ensemble data assimilation method, flux inversion at high temporal (daily) and spatial (model grid) resolution, using satellite data to constrain the inversion, and development of a new observational screening technique.

In recent decades, the density of the observational network established to monitor greenhouse gases in the atmosphere has been increased, and more measurements taken onboard ships and aircraft are becoming available (Karion et al., 2013; Tohjima et al., 2015). Satellite observations of the column-averaged dry-air mole fraction of greenhouse gases have the potential to significantly advance our knowledge of greenhouse gases distributions globally and provide new information on regional sources and sinks. Observations are available from space-based instruments such as the SCanning Imaging Absorption SpectroMeter for Atmospheric CHartographY (SCIAMACHY; Bovensmann et al., 1999), the Greenhouse gases Observing Satellite (GOSAT; Kuze et al., 2016; Yokota et al., 2009), and the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2; Crisp et al., 2004). These satellites provide unprecedented spatial coverage of the variability in greenhouse gases around the world, with the exception of Polar Regions and areas with dense clouds. These observations are, however, limited by the orbit of the satellites, which typically measure in the local afternoon.

Ground-based Fourier Transform Spectrometer (FTS) observations available from the Total Carbon Column Observing Network (TCCON) provide dense temporal resolution and are more precise and accurate than space-based instruments (Wunch et al., 2011). However, the number of ground-based FTS sites is limited, with just 23 operational sites and several approved for the future. These sites are sparsely distributed, and Siberia, Africa, South America, and the oceans from middle to high latitudes are poorly covered. Despite this limitation, FTS observations are used to validate satellite retrievals in order to assess bias, variability, and other key parameters.

Being one of the largest carbon reservoirs in the world, the Siberian carbon sink however remains poorly understood due to the limited numbers of observation. The Center for Global Environmental Research (CGER) of the National Institute for Environmental Studies (NIES) of Japan, with the cooperation of the Russian Academy of Science (RAS), began periodic, precise aircraft measurements of vertical profiles from the planetary boundary layer (PBL) to the lower free troposphere over Surgut (SUR) in 1993, Yakutsk (YAK) in 1996, Novosibirsk (NOV) in 1997 and Berezorechka (BRZ) in 2002. Similar measurements were carried out from aircraft at altitudes of up to 4000 m over Zotino (ZOTTO) in central Siberia from 1998 to 2005 by the Max Planck Institute for Biogeochemistry. In addition, CGER/NIES and RAS constructed a new Siberian tower network (eight towers in western Siberia and one in eastern Siberia at Yakutsk), Japan-Russia Siberian Tall Tower Inland Observation Network (JR-STATION) in 2002 to observe regional and short-term variations of greenhouse gases (CO₂ and

CH₄) (Sasakawa et al., 2010). High-quality, continuous measurements began at the Zotino Tall Tower Observatory at ZOTTO in April 2009.

Eddy covariance data from Siberian sites are representing the main ecosystem types: a natural grassland-steppe, regenerating grassland and abandoned fields near Hakasia in southern Central Siberia; a bog, a pine forest, a mixed forest and a Siberian fir forest near Zotino in Central Siberia; a larch and a pine forest near Yakutsk in Eastern Siberia; a typical tundra site near Chokurdakh in Northeastern Siberia; and a tussock sedge tundra site on a floodplain near the latitudinal tree line near Cherskii in the far northeast of Siberia (Dolman et al., 2012).

For CH₄ emissions in Siberia, primary reference for in situ observations was the estimate of Glagolev et al. (2011). This product consists of both a database of over 2000 individual chamber observations from representative landforms at each of 36 major sites over the period 2006–2010 and a map of long-term average emissions created by applying the mean observed emissions to the wetlands map as a function of wetland type.

Siberian is target region for a multidisciplinary, multiscale and multicomponent research programs (i.e. the Pan-Eurasian Experiment (PEEX) program (Kulmala et al., 2015), Arctic Climate Change Research Project "Rapid Change of the Arctic Climate System and its Global Influences 2011-2016" [http://www.nipr.ac.jp/grene/e/grene_E.pdf]), which are aiming at resolving the major uncertainties in Earth system science and global sustainability issues concerning the Arctic and boreal pan-Eurasian regions.

References:

1. Bovensmann, H., Burrows, J. P., Buchwitz, M., Frerick, J., Noël, S., Rozanov, V. V., Chance, K. V., and Goede, A. P. H.: SCIAMACHY: Mission objectives and measurement modes, *J. Atmos. Sci.*, 56, 127–150, 1999.
2. Crisp, D., Atlas, R. M., Bréon, F.-M., Brown, L. R., Burrows, J. P., Ciais, P., Connor, B. J., Doney, S. C., Fung, I. Y., Jacob, D. J., Miller, C. E., O'Brien, D., Pawson, S., Randerson, J. T., Rayner, P., Salawitch, R. S., Sander, S. P., Sen, B., Stephens, G. L., Tans, P. P., Toon, G. C., Wennberg, P. O., Wofsy, S. C., Yung, Y. L., Kuang, Z., Chudasama, B., Sprague, G., Weiss, P., Pollock, R., Kenyon, D., and Schroll, S.: The Orbiting Carbon Observatory (OCO) mission, *Adv. Space Res.*, 34, 700–709, 2004.
3. Denning, A. S., Holzer, M., Gurney, K. R., Heimann, M., Law, R. M., Rayner, P. J., Fung, I. Y., Fan, S., Taguchi, S., Friedlingstein, P., Balkanski, Y., Taylor, J., Maiss, M., and Levin, I.: Three-dimensional transport and concentration of SF₆: a model intercomparison study (TransCom-2), *Tellus B*, 51, 266–297, 1999.
4. Dolman, A. J., Shvidenko, A., Schepaschenko, D., Ciais, P., Tchepakova, N., Chen, T., van der Molen, M. K., Beletti Marchesini, L., Maximov, T. C., Maksyutov, S., and Schulze, E.-D.: An estimate of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory-based, eddy covariance and inversion methods, *Biogeosciences*, 9, 5323–5340, doi:10.5194/bg-9-5323-2012, 2012.
5. Enting, I. G., and Mansbridge, J. V.: Seasonal sources and sinks of atmospheric CO₂: Direct inversion of filtered data, *Tellus B*, 41B, 111–126, doi: 10.1111/j.1600-0889.1989.tb00129.x, 1989.
6. Glagolev, M., Kleptsova, I., Filippov, I., Maksyutov, S., and Machida, T.: Regional methane emission from West Siberia mire landscapes, *Environ. Res. Lett.*, 6, 045214, doi:10.1088/1748-9326/6/4/045214, 2011.
7. Gurney, K. R., Law, R. M., Denning, A. S., Rayner, P. J., Baker, D., Bousquet, P., Bruhwiler, L., Chen, Y.-H., Ciais, P., Fan, S., Fung, I., Gloor, M., Heimann, M., Higuchi, K., John, J., Maki, T., Maksyutov, S., Masarie, K., Peylin, P., Prather, M., Pak, B. C., Randerson, J. R., Sarmiento, J., Taguchi, S., Takahashi, T. and Yuen, C.-W.: Towards robust regional estimates of CO₂ sources and sinks using atmospheric transport models, *Nature*, 415, 626–630, 2002.
8. IPCC 2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects, Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Barros, V. R., Field, C. B., Dokken, D. J., Mastrandrea, M. E., Mach, K. J., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Ebi, K. L., Estrada, Y. O., Genova, R. C., Girma, B., Kissel, E. S., Levy, A. N., MacCracken, S., Mastrandrea, P. R., and White, L. L., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014.
9. Karion, A., Sweeney, C., Wolter, S., Newberger, T., Chen, H., Andrews, A., Kofler, J., Neff, D., and Tans, P.: Long-term greenhouse gas measurements from aircraft, *Atmos. Meas. Tech.*, 6, 511–526, doi:10.5194/amt-6-511-2013, 2013.
10. Kulmala, M., Lappalainen, H. K., Petäjä, T., Kurten, T., Kerminen, V.-M., Viisanen, Y., Hari, P., Sorvari, S., Bäck, J., Bondur, V., Kasimov, N., Kotlyakov, V., Matvienko, G., Baklanov, A., Guo, H. D., Ding, A., Hansson, H.-C., and Zilitinkevich, S.: Introduction: The Pan-Eurasian Experiment (PEEX) – multidisciplinary, multiscale and multicomponent research and capacity-building initiative, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 13085–13096, doi:10.5194/acp-15-13085-2015, 2015.
11. Kuze, A., Suto, H., Shiomi, K., Kawakami, S., Tanaka, M., Ueda, Y., Deguchi, A., Yoshida, J., Yamamoto, Y., Kataoka, F., Taylor, T. E., and Buijs, H.: Update on GOSAT TANSO-FTS performance, opera-

- tions, and data products after more than six years in space, Atmos. Meas. Tech. Discuss., doi:10.5194/amt-2015-333, in review, 2016.
12. Papale, D., Reichstein, M., Aubinet, M., Canfora, E., Bernhofer, C., Kutsch, W., Longdoz, B., Rambal, S., Valentini, R., Vesala, T., and Yakir, D.: Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation, Biogeosciences, 3, 571–583, doi:10.5194/bg-3-571-2006, 2006.
 13. Sasakawa, M., K. Shimoyama, T. Machida, N. Tsuda, H. Suto, M. Arshinov, D. Davydov, A. Fofonov, O. Krasnov, T. Saeki, Y. Koyama, and S. Maksyutov, Continuous measurements of methane from a tower network over Siberia, Tellus 62B, 403–416, 2010.
 14. Slater, A. G. and Lawrence, D. M.: Diagnosing present and future permafrost from climate models, J. Climate, 26, 5608–5623, doi:10.1175/JCLI-D-12-00341.1, 2013.
 15. Tans, P. P., Conway, T. J., and Nakazawa, T.: Latitudinal distribution of the sources and sinks of atmospheric carbon dioxide derived from surface observations and an atmospheric transport model, J. Geophys. Res., 94, 5151–5172, 1989.
 16. Tohjima, Y., Terao, Y., Mukai, H., Machida, T., Nojiri, Y., & Maksyutov, S.: ENSO-related variability in latitudinal distribution of annual mean atmospheric potential oxygen (APO) in the equatorial Western Pacific. Tellus B, 67. doi:http://dx.doi.org/10.3402/tellusb.v67.25869, 2015.
 17. Wunch D., Toon, G.C., Blavier, J.-F.L., Washenfelder, R.A., Notholt, J., Connor, B.J., Griffith, D.W.T., Sherlock, V., and Wennberg, P.O.: The Total Carbon Column Observing Network, Phil. Trans. R. Soc. A 369, 2087–2112, doi:10.1098/rsta.2010.0240, 2011.
 18. Yokota, T., Yoshida, Y., Eguchi, N., Ota, Y., Tanaka, T., Watanabe, H., and Maksyutov, S.: Global concentrations of CO₂ and CH₄ retrieved from GOSAT: First preliminary results, SOLA, 5, 160–163, doi:10.2151/sola.2009-041, 2009.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОРЯ ЛАПТЕВЫХ, ОБУСЛОВЛЕННОЙ ВЛИЯНИЕМ РЕЧНОГО СТОКА И СОСТОЯНИЕМ АТМОСФЕРЫ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

Голубева Е.Н., Платов Г.А., Малахова В.В., Якшина Д.Ф., Крайнева М. В.

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
Новосибирск, Россия
E-mail: elen@ommfao.sccc.ru*

Мы представляем результаты моделирования состояния вод моря Лаптевых на основе трехмерной численной региональной модели океана и морского льда с использованием данных реанализа атмосферы. Основной задачей являлось исследование распространения пресной теплой воды реки Лены на шельфе моря Лаптевых. Результаты численных расчетов показывают взаимосвязь между изменчивостью солёности поверхностных вод и состоянием атмосферной динамики региона. Численная модель воспроизводит две основные траектории движения поверхностных вод, обусловленные атмосферной циркуляцией региона: циклоническую и антициклоническую. При циклоническом типе летней циркуляции происходит распространение пресных речных вод в восточном направлении. В период антициклонической циркуляции интенсивный поток, направленный на север, обеспечивает перенос пресных речных вод к внешней зоне шельфа.

Поток тепла, поступающий с водами реки Лены, обеспечивает дополнительное таяние льда в регионе моря Лаптевых (10% по сравнению с вкладом атмосферы). Наибольшие значения температурных аномалий, вызванных речным стоком, моделируются в непосредственной близости от дельты реки. Распространение этих аномалий на шельфе моря Лаптевых зависит от направления циркуляции воды в летний сезон.

Важно, что мы получили положительные аномалии температуры, обусловленные речным стоком, в придонном слое шельфовой зоны. Появление положительных аномалий температуры может оказывать влияние на состояние субаквальной мерзлоты. Влияние тепла, поступающего в летний период с водами реки Лены и распространяющегося осенью вдоль побережья в придонном слое, на тепловой режим донных отложений в районе дельты было подтверждено численными расчетами. Деградация верхнего слоя субаквальной мерзлоты происходит наиболее быстро в прибрежной зоне шельфа и в районах, подверженных влиянию речного стока.