

## Моделирование вклада континентальных антропогенных источников в изменчивость концентрации CO<sub>2</sub> в зимний период на острове Хатерума

А.В. Ганьшин<sup>1</sup>, Р.В. Журавлев<sup>1</sup>, Ш.Ш. Максютгов<sup>2</sup>,  
А.Н. Лукьянов<sup>1</sup>, Н. Мукай<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория» (ЦАО)  
141700, г. Долгопрудный, Московская обл., ул. Первомайская, 3, Россия

<sup>2</sup>National Institute for Environmental Studies,  
16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki, 305-8506, Japan

Поступила в редакцию 1.02.2012 г.

Анализ данных непрерывных наблюдений CO<sub>2</sub> в зоне влияния выбросов загрязняющих веществ с территории Китая проведен с использованием методики моделирования переноса CO<sub>2</sub> при помощи комбинации сеточной и лагранжевой дисперсионной моделей переноса атмосферных примесей с учетом данных по поверхностным потокам углекислого газа антропогенного, биосферного и океанического происхождения. Сравняются результаты модельных расчетов с данными наблюдения на ст. Хатерума (Япония), получено хорошее их совпадение. Исследуется влияние выбросов источников загрязнений, расположенных на территории Китая, на моделируемые временные ряды. Выполнены расчеты с учетом эмиссий выбросов со стороны КНР и без них, которые показали, что в зимний период основной вклад в изменчивость CO<sub>2</sub> на станции наблюдения вносят антропогенные выбросы с территории Китая. Доминирование вклада региональных антропогенных выбросов в наблюдаемом сигнале указывает на возможности эффективного использования данных мониторинга на ст. Хатерума при моделировании переноса в регионе и решении обратных задач о межгодовой изменчивости антропогенных выбросов CO<sub>2</sub> и других газов.

*Ключевые слова:* атмосфера, моделирование, парниковые газы, углекислый газ; atmosphere, modeling, greenhouse gases, carbon dioxide.

### Введение

Для анализа данных стационарных измерений необходимо иметь модельный инструмент, позволяющий точно и с наименьшими ресурсными затратами проводить оценку концентрации парниковых газов, в частности CO<sub>2</sub>, в точке наблюдения. Обычно такая задача решается с использованием эйлеровых моделей, которые позволяют получить поля концентраций на сетке с определенным разрешением. В этом случае значения в точке наблюдения получают интерполированием сеточных данных. Данные, полученные таким образом, хорошо воспроизводят сезонную и межгодовую изменчивость, но сглаживают суточные и часовые вариации концентраций. Сравнение моделей переноса CO<sub>2</sub> показало, что синоптическая изменчивость лучше воспроизводится моделями переноса высокого пространственного разре-

шения и более высокого порядка аппроксимации по сравнению с моделями среднего разрешения [1].

При переходе к более мелкому разрешению модельные результаты приближаются к данным наблюдений, однако точная структура не воспроизводится [2] и, кроме того, требуются большие затраты машинного времени. Лагранжевы модели, основанные на расчете траекторий отдельных частиц, могут эффективно использоваться в задачах прямого и обратного переноса для расчета откликов на выбросы газов в атмосферу [3, 4]. Кроме того, этот тип моделей воспроизводит краткосрочные вариации, но описание сезонной изменчивости требует продолжительных траекторий (месяцы), что также приводит к большим вычислительным затратам. В связи с этим вполне логичным является 2-шаговое моделирование концентраций в точке наблюдения, т.е. объединение моделей. В настоящей статье используются эйлерова модель NIES TM [2, 5] и лагранжева дисперсионная модель FLEXPART [6], объединенные в модель GELCA, которая подробно описана в статье [7]. Для дальнейшего тестирования модели и демонстрации ее возможностей мы провели моделирование на станции мониторинга Хатерума (24,05° с.ш., 123,80° в.д.).

\* Александр Викторович Ганьшин (alex@ganshin.ru); Руслан Валерьевич Журавлев (ruslan.zhuravlev@gmail.com); Шамиль Шавратович Максютгов (shamil@nies.go.jp); Александр Николаевич Лукьянов (lukyanov@caomsk.mipt.ru); Н. Мукай (shamil@nies.go.jp).

Этот небольшой остров (площадь 12,5 км<sup>2</sup>) является самой южной точкой Японии и расположен в 220 км от Тайваня. Преобладающим направлением ветра является южное летом и северо-западное зимой. В связи с этим предполагается, что выбросы в континентальной Азии могут оказывать сильное влияние на концентрацию на этой станции. С помощью объединенной модели мы попытаемся проанализировать причину сильных кратковременных всплесков в данных наблюдений.

Наблюдения на станции проводятся непрерывно и доступны с 1993 г. [8]. В настоящей статье мы использовали данные за 2002 и 2006 гг.

## Описание объединенной модели

В качестве поверхностных потоков углекислого газа используются три вида источников CO<sub>2</sub>: антропогенные источники с месячной изменчивостью [9], обмен биосферы с атмосферой с дневной изменчивостью [10] и обмен океана с атмосферой с месячной сезонной изменчивостью [11]. В модели заданные потоки интерполируются по времени к необходимой дате.

Расчет в нашем подходе осуществляется способом, описанным ниже. Первоначально, в течение года до момента измерений с использованием эйлеровой модели (NIES TM) рассчитываются глобальные фоновые концентрации, в которых отражается сезонная изменчивость. Затем в обратном направлении по времени используется лагранжева дисперсионная модель (FLEXPART), которая в течение недели собирает вклад локальных наземных эмиссий в точку наблюдения за этот срок, а также определяет вклад в итоговую концентрацию в точке от фоновых значений, рассчитанных глобальной моделью. Вследствие отсутствия численной диффузии, присущей эйлеровым моделям, FLEXPART обеспечивает менее сглаженные концентрации.

Расчет фоновой концентрации продолжительностью 1 год обусловлен так называемым эффектом «spin up», связанным с тем, что в начальный момент времени в модели поля концентраций задаются нулевыми, что приводит к быстрому увеличению концентрации в течение первых нескольких месяцев. За год концентрации и потоки выходят на определенный баланс, что делает возможным изучать сезонную изменчивость концентраций.

Подробное описание расчетных формул, а также самой объединенной модели приведено в работе [7], поэтому запишем лишь конечную формулу в дискретном виде для случая поверхностных потоков, реализованную в модели:

$$C(x_r, t_r) = \frac{T m_{air}}{h N L \rho m_{CO_2}} \sum_{ij} \sum_{l=0}^L F_{ij}^l \sum_{n=1}^N f_{ij}^{ln} + \frac{1}{N} \sum_{ijk} C_{ijk}^B \sum_{n=1}^N f_{ijk}^n, \quad (1)$$

где  $i, j, k$  – индексы, характеризующие положение частицы в ячейке;  $l$  – индекс по времени;  $n$  – ин-

декс по частицам;  $F_{ij}^l$  – поверхностные потоки, кг · м<sup>-2</sup> · с<sup>-1</sup>;  $C_{ijk}^B$  – фоновые концентрации эйлеровой модели;  $f_{ijk}^n$  принимает значения 1, если частица находится в ячейке  $i, j, k$ , или 0, если за ее пределами;  $T$  – продолжительность траектории;  $L$  – количество шагов по времени;  $N$  – суммарное количество частиц;  $h$  – высота, до которой считается значимым влияние поверхностных потоков;  $\rho$  – средняя плотность воздуха ниже высоты  $h$ ;  $m_{air}$  и  $m_{CO_2}$  – молярные массы воздуха и углекислого газа. Модель FLEXPART из точки наблюдения рассчитывает одновременно 7-дневные обратные траектории тысяч воздушных частиц, рассеивающихся под действием турбулентной диффузии. Сеточные фоновые значения концентраций, интерполированные в конечные точки обратных траекторий, переносятся в точку наблюдения и являются вторым слагаемым правой части формулы (1). Первое слагаемое этой формулы обусловлено вкладом источников рассматриваемой компоненты, которые расположены вдоль траекторий внутри слоя  $h$  (500 м). В конечном итоге значение первого слагаемого пропорционально потоку в каждой ячейке вдоль траектории и времени, в течение которого воздушная частица находится внутри этой ячейки.

В качестве метеорологических полей используются данные JCDAS [12], проинтерполированные на регулярную сетку (разрешение 1,25° × 1,25°) с сохранением вертикальной структуры (40 модельных уровней).

## Сравнение результатов моделирования по совмещенной модели переноса примесей с данными наблюдений

Алгоритм, описанный в предыдущем разделе, в равной степени может быть применен для анализа спутниковых, баллонных, самолетных и мачтовых наблюдений.

В данном разделе представлены результаты расчетов концентрации CO<sub>2</sub> по совмещенной модели для ст. Хатерума, где регулярно проводятся измерения CO<sub>2</sub> и других парниковых газов. Высота забора воздуха составляет 51 м над поверхностью Земли.

Как показано в статье [13], NIES TM воспроизводит сезонный ход, но сглаживает суточные и часовые вариации. С другой стороны, результаты 7-дневного моделирования FLEXPART воспроизводят часовые вариации, но не наблюдается сезонного хода. Для описания сезонного хода с помощью лагранжевых моделей и этого метода необходимо использовать траектории продолжительностью более 3 мес, однако при этом возникают нарастающие ошибки для столь продолжительных траекторий и большие вычислительные затраты [14]. Максимальные корреляции с наблюдениями отмечаются при использовании совмещенной модели.

Для расчетов в нашей методике используется количество частиц, равное 1000. При проведении сравнений результатов расчетов, полученных с разным количеством частиц, выяснилось, что текущее число является оптимальным. При увеличении числа частиц на порядок (до 10 000) происходит слабое улучшение в результатах, однако при этом вычислительные затраты возрастают многократно. Уменьшение же числа частиц меньше 100 приводит к заметному ухудшению модельных данных.

Продолжительность обратных траекторий FLEXPART варьируется в зависимости от удаленности источников и стоков рассматриваемого газа от точки наблюдения.

Исследование зависимости такой корреляции от продолжительности траекторий показало, что оптимальным сроком являются 2 дня для большинства станций. Однако эта величина зависит от близости локальных источников к точке наблюдения и для разных станций может быть различной.

В работе [15] на основе траекторного анализа мачтовых наблюдений показано, что в погранслое наблюдения сохраняют однозначную связь с источниками на протяжении не более 1,5 дня и все эти источники расположены внутри области, не превышающей  $1000 \times 1000$  км вокруг станции наблюдения. Для континентальных мачтовых наблюдений в летний период вариации концентрации  $\text{CO}_2$  на 50% обусловлены влиянием подстилающей поверхности в радиусе 20–60 км от мачты [16].

При самолетных наблюдениях функция влияния измеряемой концентрации на тропосферных высотах распространяется на большие площади, и бо-

лее удаленные источники вносят свой вклад в наблюдаемые концентрации. Таким образом, продолжительность обратных траекторий определяется местом проведения и высотой наблюдений, а также временем года для компонент с сезонной изменчивостью наземных потоков. Для моделирования концентрации на ст. Хатерума мы использовали 7-дневные траектории, так как эта станция расположена вдали от крупных источников эмиссий.

Положение выбранной станции оказывает влияние и на измеряемую концентрацию. Особенно это заметно в зимний период, когда происходит перенос воздушных масс с континентальной части Азии в сторону территории Японии под действием Североазиатского муссона. Для оценки влияния антропогенных выбросов Китая на концентрацию в точке ст. Хатерума было проведено сравнение результатов расчета с учетом и без учета эмиссий с территории Китая. Для этого в качестве Китая был выбран регион, покрывающий его территорию с разрешением  $1 \times 1^\circ$ , для которого эмиссии антропогенного, биосферного и океанического происхождения полагались равными нулю в случае исключения территории Китая из рассмотрения. На рис. 1 и 2 показаны результаты расчетов для 2002 и 2006 гг. с учетом и без учета выбросов всех типов загрязнений с территории Китая для зимнего периода. Для выделения вклада от поверхностных потоков выбранного района результаты представлены только с учетом лагранжовой части концентрации [первая часть формулы (1)].

Как видно из рис. 1 и 2, объединенная модель воспроизводит большинство острых пиков, которые

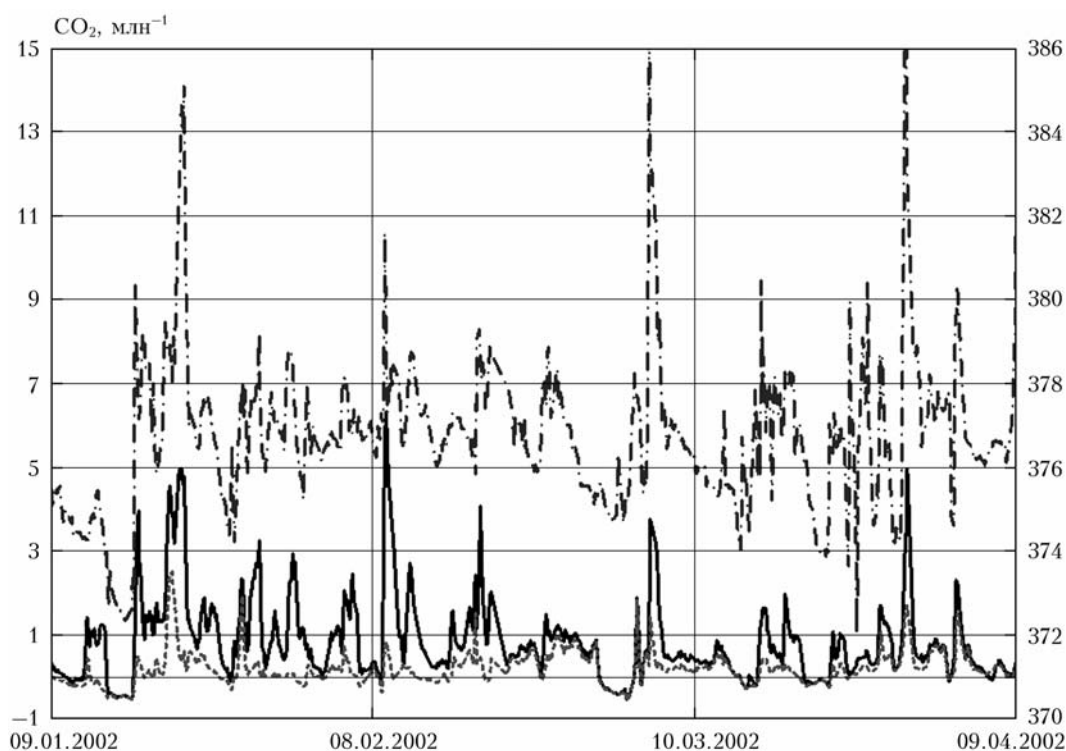


Рис. 1. Модельные концентрации с учетом (сплошная линия) и без учета (пунктирная) эмиссий  $\text{CO}_2$  с территории Китая (левая ось), а также данные наблюдений (штрихпунктирная) на ст. Хатерума, 2002 г. (правая ось)

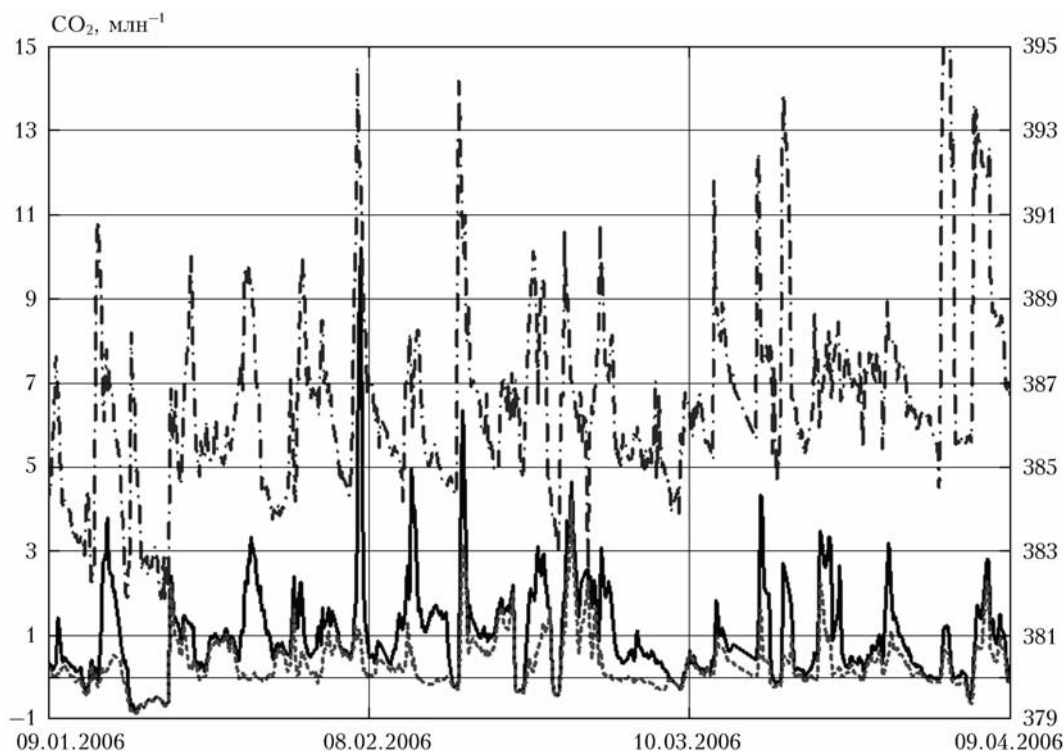


Рис. 2. Модельные концентрации с учетом (сплошная линия) и без учета (пунктирная) эмиссий  $\text{CO}_2$  с территории Китая (левая ось), а также данные наблюдений (штрихпунктирная) на ст. Хатерума, 2006 г. (правая ось)

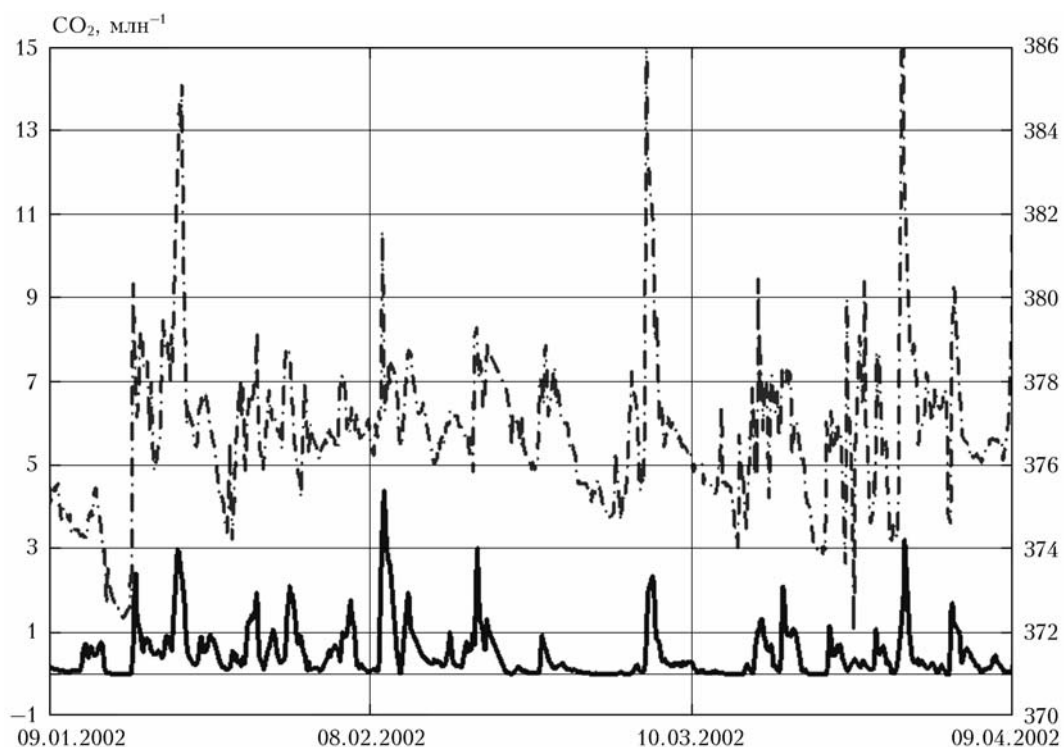


Рис. 3. Сравнение модельного вклада (сплошная линия) от антропогенных выбросов с территории Китая в наблюдаемую концентрацию  $\text{CO}_2$  (левая ось) (штрихпунктирная) на ст. Хатерума для 2002 г. (правая ось)

присутствуют в наблюдениях (сплошная линия). Если же убрать выбросы, обусловленные влиянием Китая на выбранную станцию (пунктирная линия), то пропадают часть резких пиков, а также снижает-

ся значение полученных концентраций. Если рассматривать значения корреляции между модельными данными и наблюдениями, то при удалении из рассмотрения эмиссий от Китая они падают с 0,63

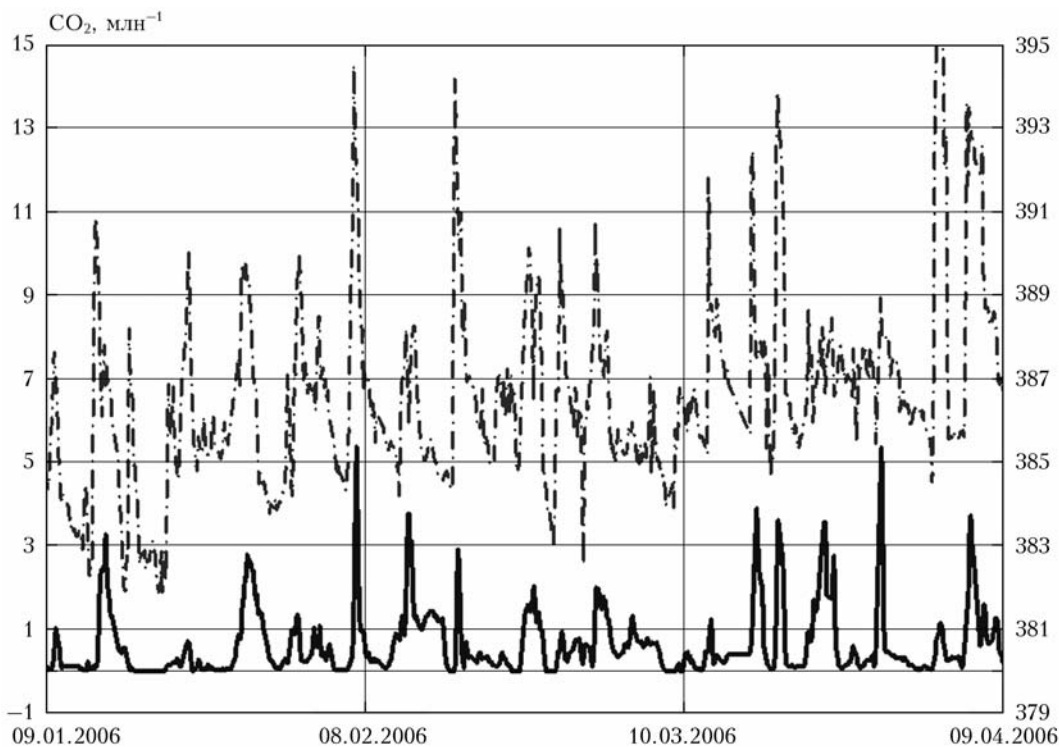


Рис. 4. Сравнение модельного вклада (сплошная линия) от антропогенных выбросов с территории Китая в наблюдаемую концентрацию  $\text{CO}_2$  (левая ось) (штрихпунктирная) на ст. Хатерума для 2006 г. (правая ось)

до 0,59 для 2002 г. и с 0,44 до 0,31 для 2006 г. (здесь приведены значения коэффициентов корреляции для зимнего периода времени, отвечающие только первому члену формулы (1), т.е. без учета сезонного хода). Отсюда можно сделать вывод, что кратковременные увеличения концентрации углекислого газа на ст. Хатерума обусловлены парниковыми газами, приносимыми с территории Китая. Если построить график вклада только от антропогенных эмиссий КНР, то становится видно, что их вклад в такие увеличения является определяющим, что показано на рис. 3 и 4, где даны результаты сравнения данных наблюдений и вклада в них антропогенных выбросов с территории Китая.

### Заключение

В представленной статье продемонстрирована возможность моделирования концентрации  $\text{CO}_2$  в точке наблюдения с помощью объединенной эйлерово-лагранжевой модели и поверхностных потоков антропогенного, биосферного и океанического происхождения. Описанный выше алгоритм позволяет эффективно реконструировать мачтовые, самолетные и спутниковые наблюдения с целью последующего определения глобальных и региональных источников и стоков измеряемой компоненты. В рамках статьи показано, что основной вклад в изменчивость концентрации на ст. Хатерума вносят антропогенные выбросы Китая, особенно в зимний период. Доминирование вклада региональных антропогенных выбросов в наблюдаемом сигнале указывает на возможности эффективного использования дан-

ных мониторинга на ст. Хатерума при моделировании переноса в регионе и решении обратных задач о межгодовой изменчивости антропогенных выбросов  $\text{CO}_2$  и других газов. Модель используется для восстановления источников и стоков парниковых газов, а также уточнения имеющихся данных по эмиссиям с высоким разрешением.

1. Patra P.K., Law R.M., Peters W., Rodenbeck C., Takigawa M., Aulagnier C., Baker I., Bergmann D.J., Bousquet P., Brandt J., Bruhwiler L., Cameron-Smith P.J., Christensen J.H., Delage F., Denning A.S., Fan S., Geels C., Houweling S., Imasu R., Karstens U., Kawa S.R., Kleist J., Krol M.C., Lin S.-J., Lokupitiya R., Maki T., Maksyutov S., Niwa Y., Onishi R., Parazoo N., Pieterse G., River L., Satoh M., Serrar S., Taguchi S., Vautard R., Vermeulen A.T., Zhu Z. TransCom model simulations of hourly atmospheric  $\text{CO}_2$ : Analysis of synoptic-scale variations for the period 2002–2003 // *Global Biogeochem. Cycl.* 2008. V. 22. GB4013.
2. Maksyutov S., Patra P.K., Onishi R., Saeki T., Nakazawa T. NIES/FRCGC Global Atmospheric Tracer Transport Model: Description, Validation, and Surface Sources and Sinks Inversion // *J. Earth Simulator.* 2008. V. 9. P. 3–18.
3. Пененко В.В. Выявление областей повышенной экологической уязвимости: концепция и подходы к реализации // *Оптика атмосф. и океана.* 2001. Т. 14, № 6–7. С. 596–600.
4. Пененко В.В. Вариационные методы усвоения данных и обратные задачи для изучения атмосферы, океана и окружающей среды // *Сиб. ж. вычисл. матем.* 2009. Т. 12, № 4. С. 421–434.
5. Belikov D., Maksyutov S., Miyasaka T., Saeki T., Zhuravlev R., Kiryushov B. Mass-conserving tracer transport modelling on a reduced latitude-longitude grid with

- NIES-TM // Geosci. Model Dev. 2011. V. 4. P. 207–222.
6. *Stohl A., Forster C., Frank A., Seibert P., Wotawa G.* Technical note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2 // Atmos. Chem. Phys. 2005. V. 5. P. 2461–2474.
  7. *Ganshin A., Oda T., Saito M., Maksyutov S., Valsala V., Andres R.J., Fisher R.E., Lowry D., Lukyanov A., Matsueda H., Nisbet E.G., Rigby M., Sawa Y., Toumi R., Tsuboi K., Varlagin A., Zhuravlev R.* A global coupled Eulerian–Lagrangian model and  $1 \times 1$  km CO<sub>2</sub> surface flux dataset for high-resolution atmospheric CO<sub>2</sub> transport simulations // Geosci. Model Dev. 2012. V. 5. P. 231–243.
  8. *Mukai H., Katsumoto M., Ide R., Machida T., Fujinuma Y., Nojiri Y., Inagaki M., Oda N., Watai T.* Characterization of atmospheric CO<sub>2</sub> observed at two-background air monitoring stations (Hateruma and Ochiishi) in Japan (abstract). Paper presented at Sixth International Carbon Dioxide Conference. Org. Comm. of Sixth Int. Carbon Dioxide Conf., Sendai, Japan. 2001.
  9. *Oda T., Maksyutov S.* A very high-resolution ( $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ ) global fossil fuel CO<sub>2</sub> emission inventory derived using a point source database and satellite observations of nighttime lights // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 11. P. 543–556.
  10. *Saito M., Ito A., Maksyutov S.* Evaluation of Biases in JRA-25/JCDAS precipitation and their Impact on the Global Terrestrial Carbon Balance // J. Clim. 2011. V. 21. P. 4109–4125.
  11. *Valsala K.V., Maksyutov S.* Simulation and assimilation of global ocean pCO<sub>2</sub> and air-sea CO<sub>2</sub> fluxes using ship observations of surface ocean pCO<sub>2</sub> in a simplified biogeochemical offline model // Tellus. B. 2010. V. 62. P. 821–840.
  12. *Onogi K., Tsutsui J., Koide H., Sakamoto M., Kobayashi S., Hatsushika H., Matsumoto T., Yamazaki N., Kamahori H., Takahashi K., Kadokura S., Wada K., Kato K., Oyama R., Ose T., Mannoji N., Taira R.* The JRA-25 Reanalysis // J. Meteorol. Soc. Jap. 2007. V. 85. P. 369–432.
  13. *Koyama Y., Maksyutov S., Mukai H., Thoning K., Tans P.* Simulation of atmospheric carbon dioxide variability with a global coupled Eulerian–Lagrangian transport model // Geosci. Model Dev. 2011. V. 4. P. 317–324.
  14. *Stohl A.* Computation, accuracy and applications of trajectories – review and bibliography // Atmos. Environ. 1998. V. 32, N 6. P. 947–966.
  15. *Gloor M., Bakwin P., Hurst D., Lock L., Draxler R., Tans P.* What is the concentration footprint of a tall tower // J. Geophys. Res. D. 2001. V. 106, N 16. P. 17831–17840.
  16. *Gerbig C., Dolman A.J., Heimann M.* On observational and modelling strategies targeted at regional carbon exchange over continents // Biogeosciences. 2009. V. 6. P. 1949–1959.

***A.V. Ganshin, R.V. Zhuravlev, Sh.Sh. Maksyutov, A.N. Lukyanov, H. Mukai. Simulating of the contribution of the continental anthropogenic sources to CO<sub>2</sub> concentration variability at Hateruma island.***

Our study presents an application to simulation of the China outflow of the new method for CO<sub>2</sub> concentration calculation using combination of grid-based transport model and Lagrangian particle dispersion model with carbon dioxide surface emissions of anthropogenic, biospheric, and oceanic origin. Comparison of simulation results and observation data at Hateruma station (Japan) showed good agreement. We investigated the influence of China emissions on Asia-Pacific region. For these purposes, we performed calculations at Hateruma using our coupled model with and without China region emissions. The simulations show that variation of CO<sub>2</sub> concentration at observation point is strongly affected by China anthropogenic emissions especially during winter season. The domination of the regional anthropogenic influences on the observed signal suggests opportunity for efficient application of the transport modeling for inverse modeling of the interannual variability of the regional anthropogenic emissions.