

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ НАБЛЮДАЕМОСТИ ИСТОЧНИКОВ ВЫБРОСОВ ОТ ДОРОЖНОЙ СЕТИ ГОРОДА С ПОМОЩЬЮ ОПЕРАТОРА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МОДЕЛИ ПЕРЕНОСА И ТРАНСФОРМАЦИИ ПРИМЕСИ В АТМОСФЕРЕ

Алексей Владимирович Пененко

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник; Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, научный сотрудник, тел. (383)330-61-52, e-mail: a.penenko@yandex.ru

Александр Владимирович Гочаков

Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт (ФГБУ СибНИГМИ), 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Советская, 30, старший научный сотрудник, тел. (961)874-33-93, e-mail: gochakov@sibnigmi.ru

В рамках сценарного подхода в работе оценена наблюдаемость источников выбросов от транспортной сети города по косвенным данным мониторинга. Новым является то, что для оценки наблюдаемости использован подход на основе операторов чувствительности, который позволяет получить для задачи идентификации источников семейство квазилинейных операторных уравнений. Это позволяет как решать задачу, так и использовать методы анализа линейных операторов для оценки ее свойств. Для города Новосибирска рассмотрены реалистичные метеосценарии, сценарий распределения источников выбросов транспорта и расположения постов мониторинга. В численных экспериментах дорожная сеть идентифицируется сглажено по пространству. С большей точностью восстанавливаются поля концентраций. Оценка содержащейся в данных информации об источниках на основе анализа оператора чувствительности позволяет получить экспресс-оценку решения обратной задачи.

Ключевые слова: перенос и трансформация примесей, мониторинг качества воздуха, оператор чувствительности, транспортная сеть, оценка наблюдаемости

NUMERICAL ANALYSIS OF THE OBSERVABILITY OF THE CITY ROAD NETWORK EMISSION SOURCES USING THE SENSITIVITY OPERATOR OF THE ATMOSPHERIC CHEMISTRY TRANSPORT AND TRANSFORMATION MODEL

Alexey V. Penenko

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, Novosibirsk National Research State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher, phone: (383)330-61-52, e-mail: a.penenko@yandex.ru

Alexander V. Gochakov

Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute (fgbi, Shinigmi), 30, Sovetskaya St., Novosibirsk, 630099, Russia, Senior Researcher, phone: (961)874-33-93, e-mail: gochakov@sibnigmi.ru

Within the scenario approach, the observability of traffic emission sources is estimated from indirect monitoring data. What is new is that an approach based on sensitivity operators is used to estimate observability, which allows us to obtain a family of quasilinear operator equations for the

source identification problem. This allows both solving and analyzing its properties. For the city of Novosibirsk, realistic weather scenarios, a scenario for the distribution of traffic emission sources and the location of monitoring sites are considered. In numerical experiments, the road network is identified smoothed over space. Concentration fields are restored with greater accuracy. Evaluation of the information about the sources contained in the data based on the analysis of the sensitivity operator allows one to get an express estimate of the inverse problem solution.

Keywords: transport and transformation models, air quality monitoring, sensitivity operator, traffic emissions, observability assessment

Введение

Качество атмосферного воздуха влияет на здоровье жителей современных городов. Для обеспечения своевременной оценки состояния и построения прогноза, определения последствий и поиска организаций, ответственных за компенсацию причиненного вреда здоровью населения [1], необходимо развивать системы мониторинга и методы обработки данных мониторинга для извлечения из них содержательной информации. Основными источниками загрязнения атмосферного воздуха являются выбросы от транспорта, промышленности и частного сектора. Множество источников такого типа распределено по городу. Для оптимизации систем мониторинга важно разработать экономичные методы оценки информативности данных измерений, не требующие непосредственного решения обратных задач.

Ранее мы получали оценку точности восстановления мощности основных источников для города Новосибирска на основе реально доступных данных измерений [3] при условии задания локализаций источников, как в [2]. Целью данной работы является оценка наблюдаемости источников дорожной сети города с помощью реалистичной системы мониторинга в различных метеорологических сценариях с использованием аппарата операторов чувствительности [4], [5] с учетом химических трансформаций, но без априорной локализации источников. Обзор других подходов к поиску источников дан в [6].

Методы и материалы

Рассмотрим прямоугольную пространственно-временную область $\Omega_T := \Omega \times [0, T]$, $\Omega := [0, X] \times [0, Y]$. В этой области решается задача о переносе и трансформации N_c химических веществ:

$$\frac{\partial \varphi_l}{\partial t} - \nabla \cdot (\text{diag}(\mu_l) \nabla \varphi_l - \mathbf{u} \varphi_l) + P_l(t, \varphi) \varphi_l = \Pi_l(t, \varphi) + f_l + r_l, \quad (\mathbf{x}, t) \in \Omega_T, \quad (1)$$

$$\mathbf{n} \cdot (\text{diag}(\mu_l) \nabla \varphi_l) + \beta_l \varphi_l = \alpha_l, \quad (\mathbf{x}, t) \in \Gamma_{out} \subset \partial\Omega \times (0, T], \quad (2)$$

$$\varphi_l = \alpha_l, \quad (\mathbf{x}, t) \in \Gamma_{in} \subset \partial\Omega \times (0, T], \quad (3)$$

$$\varphi_l = \varphi_l^0, \quad \mathbf{x} \in \Omega, t = 0, \quad (4)$$

где $\varphi_l = \varphi_l(x, t)$ обозначает концентрацию вещества в точке $(x, t) \in \Omega_T$. Параметры скоростей переноса $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ и диффузии $\mu_l(\mathbf{x}, t)$ задаются с помощью метеорологической модели. Процессы продукции и деструкции P_l, Π_l химических веществ задаются с помощью химической модели. Краевые и начальные условия выбираются исходя из фоновых значений. Искомой функцией в задаче идентификации источников по данным наблюдений за функцией состояния модели является функция $r_l(\mathbf{x}, t)$ в правой части системы. Кроме непосредственно задачи идентификации источников мы также рассматриваем задачу «продолжения», в которой требуется восстановить ненаблюдаемые элементы функции состояния. Данные измерений доступны в виде временных рядов I_m концентраций некоторых элементов l_m в заданных точках области χ_m .

$$I_m(t) = \varphi_{l_m}(\chi_m, t) + \delta I_m(t), m = 1, \dots, M, t \in [0, T]. \quad (5)$$

В работах [4], [5] мы развивали общий подход к решению и анализу широкого спектра обратных задач на основе операторов чувствительности. В результате применения подхода к обратной задаче она переформируется в виде семейства квазилинейных операторных уравнений вида (6)

$$M_U[\mathbf{r}^{(*)}, \mathbf{r}](\mathbf{r}^{(*)} - \mathbf{r}) = H_U I + H_U \delta I - H_U \varphi[\mathbf{r}]. \quad (6)$$

Здесь $\mathbf{r}^{(*)}$ - «точное» решение задачи идентификации источников, $\mathbf{r}$ - произвольная «пробная» функция источников, H_U - оператор проектирования функции состояния на заданную систему функций U , $M_U[\mathbf{r}^{(*)}, \mathbf{r}]$ - оператор чувствительности, I - данные и δI - погрешность измерений, отнесенные к точкам области, $\varphi[\mathbf{r}]$ - решение прямой задачи (1)-(4), соответствующее $\mathbf{r}$. Операторное уравнение (6), благодаря квазилинейному виду, можно решать соответствующими методами и исследовать его свойства с помощью линейной теории. В частности, проекция на ортогональное дополнение к ядру оператора чувствительности позволяет оценить информацию об искомой функции источников, содержащуюся в данных измерений.

Для оценки системы мониторинга мы использовали сценарный подход. Рассматриваются 4 различных 24-часовых метеорологических сценария, начинающихся в 7:00 утра, соответствующих датам 10.07.2019, 15.07.2019, 23.07.2019, 29.07.2019. Четырёхмерные метеорологические поля вычислены с помощью модели WRF [7], в качестве полей $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ и $\mu_l(\mathbf{x}, t)$ для (1)-(4) взяты приповерхностные значения. Мы сравним, как в каждом из сценариев решается обратная задача, а также как решение оценивается с помощью проекции на ортогональное дополнение к ядру оператора чувствительности.

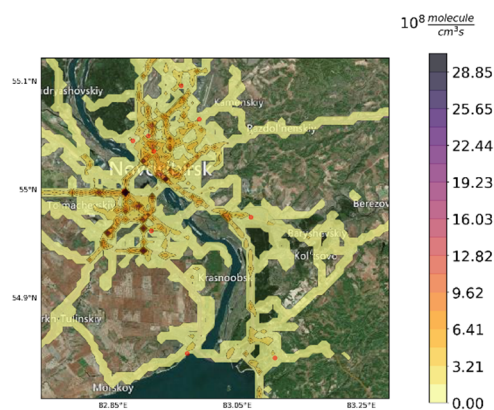


Рис. 1. Мощность модельного распределённого источника выбросов NO (отмечены контурами) и посты мониторинга (отмечены красными точками)

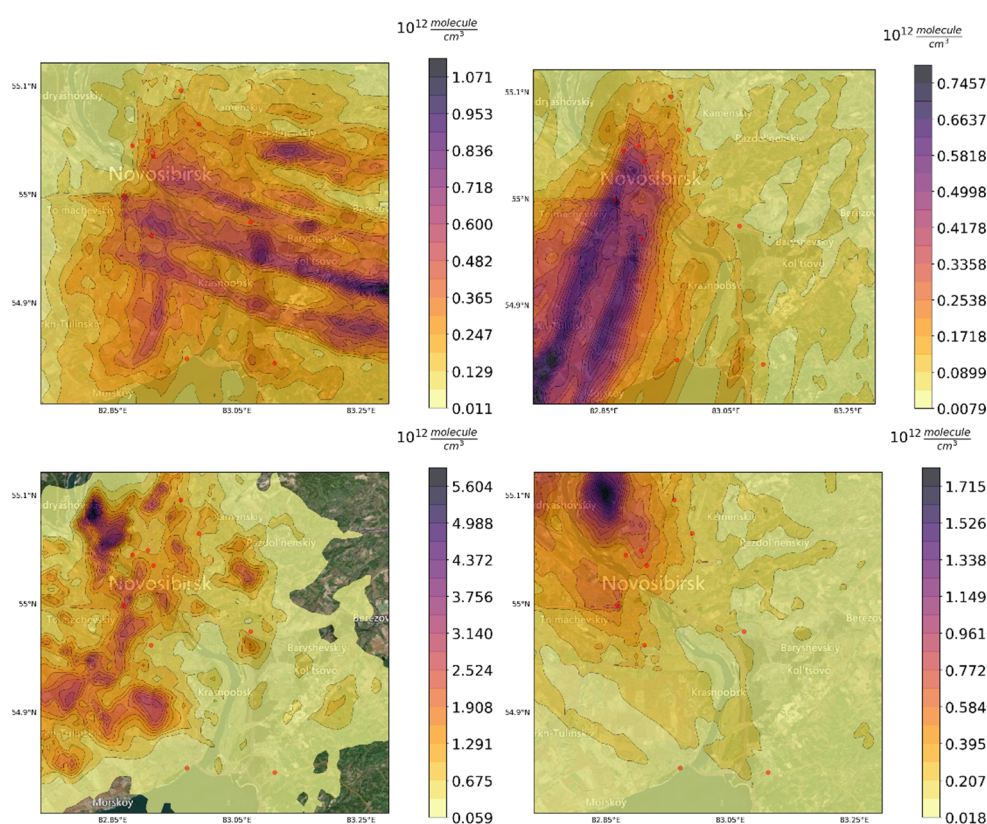


Рис. 2. Средние за день распределения концентрации загрязняющей примеси (NO) в сценариях

Для задания «точного источника» NO мы используем усреднённые за указанный день данные о количестве автомашин в заданной точке области, предоставленные компанией 2Gis (рис. 1, контуры). Мощность источника NO в точке задается пропорционально количеству машин. На рис. 2 представлены средние «точные» концентрации для каждой из дат. По этим графикам можно оценить различие между сценариями, при том, что функции источников в этих сценариях схожи.

За прототип модельной сети мониторинга взята система из Государственного доклада [10] (рис. 1, красные точки), и предположим, что в этих точках измеряются временные ряды концентраций озона. Для описания связи между химическими веществами мы использовали модель из [8] стр. 7, учитывающую концентрации NO, NO_2, O_3, O, O_2 с помощью 3х реакций, одна из которых является фотохимической.

Результаты

На рис. 3 представлены результаты восстановления источников в каждом из сценариев.

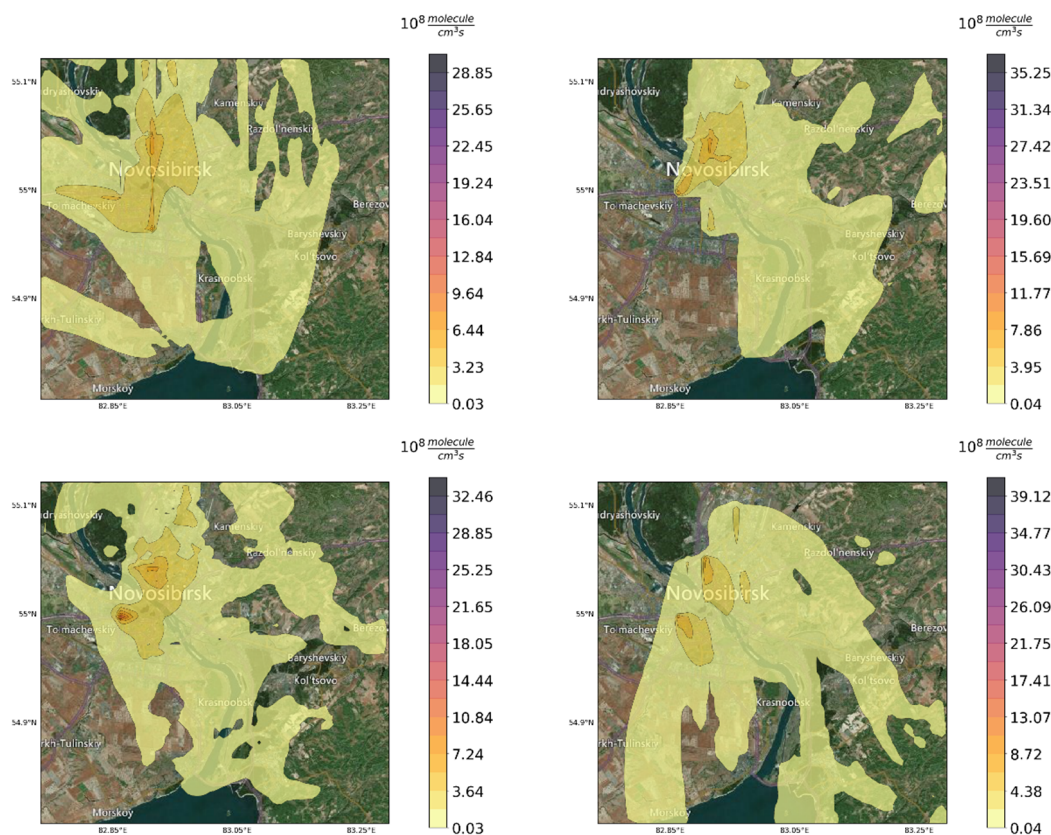


Рис. 3. Результаты восстановления источников выбросов NO

На рис. 4, *а, б* показано убывание относительной ошибки и невязки в зависимости от времени вычислений. На рис. 4, *в* показано сравнение относительной ошибки восстановления («Empirical») с ее оценкой на основе проекции на ортогональное дополнение к ядрам операторов чувствительности $M_U[\mathbf{r}^{(*)}, \mathbf{r}]$ («Exact projection») и $M_U[\mathbf{r}^{(0)}, \mathbf{r}^{(0)}]$, где $\mathbf{r}^{(0)}$ - начальное приближение к источникам («Init projection»). В данной работе $\mathbf{r}^{(0)}$ - нулевое. На рис. 5 представлены проекции «точного решения» с рис. 1 на ортогональное дополнение к ядру оператора чув-

ствительности $M_U[\mathbf{r}^{(0)}, \mathbf{r}^{(0)}]$. Такую оценку можно получить без знания точного решения. На рис. 6 показаны соответствующие восстановленным источникам с рис. 3 средние концентрации за день.

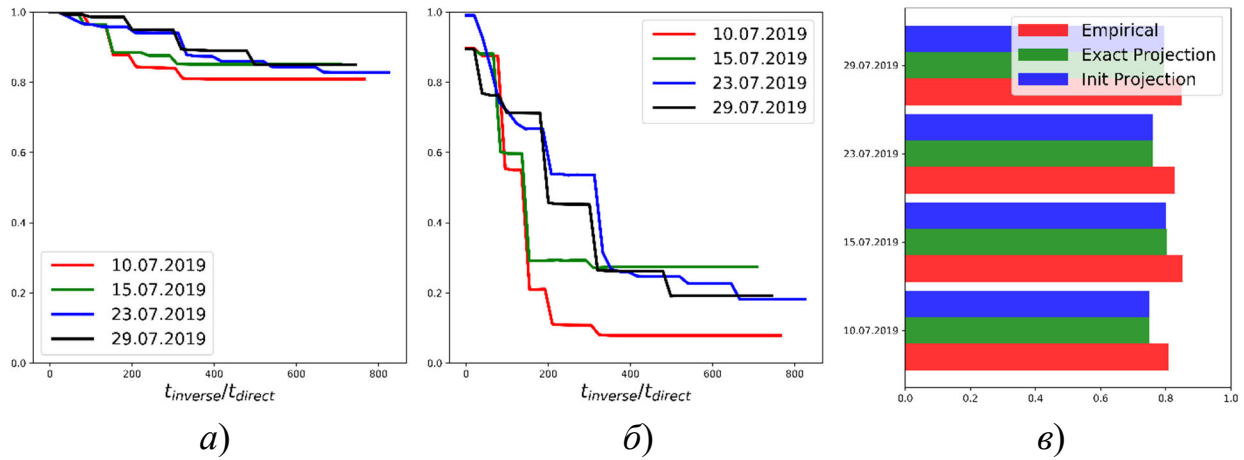


Рис. 4. Убывание относительной ошибки решения задач идентификации источников (а) и продолжения (б). Сравнение относительной ошибки, полученной в ходе решения обратной задачи («Empirical») и оценки на основе операторов чувствительности («Exact Projection» и «Init Projection») (в)

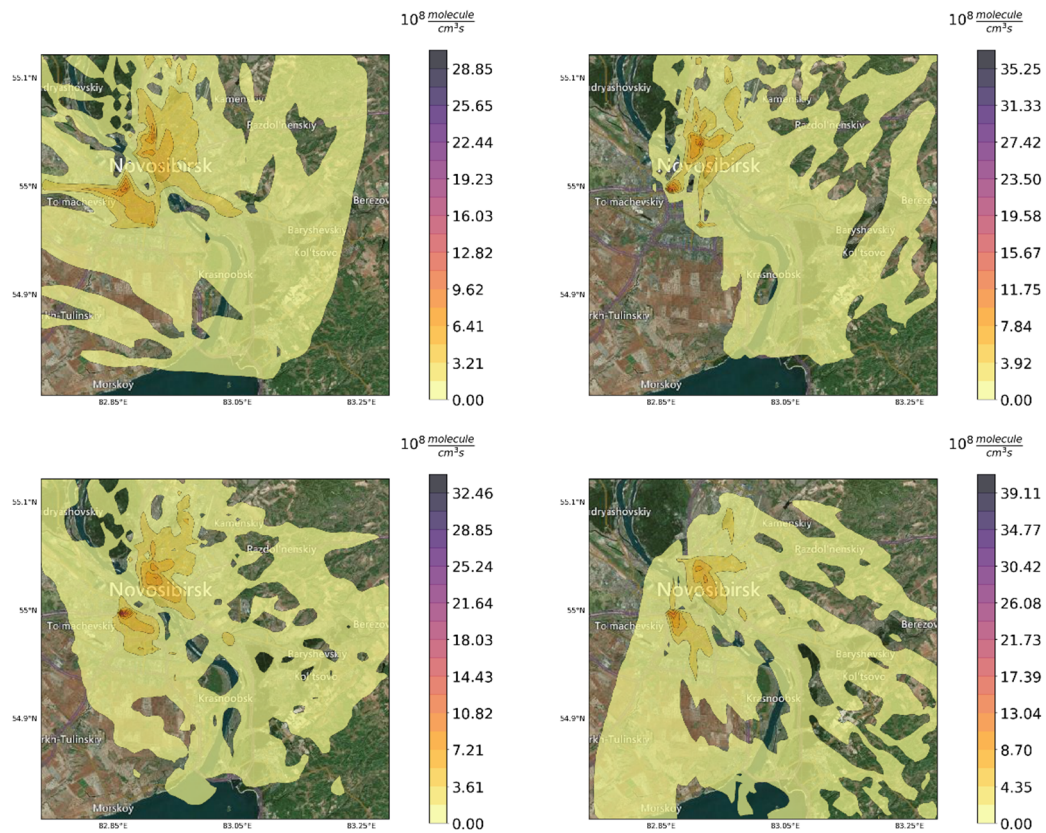


Рис. 5. Оценка восстановления источника NO через проекции на ортогональное дополнение к ядру оператора чувствительности

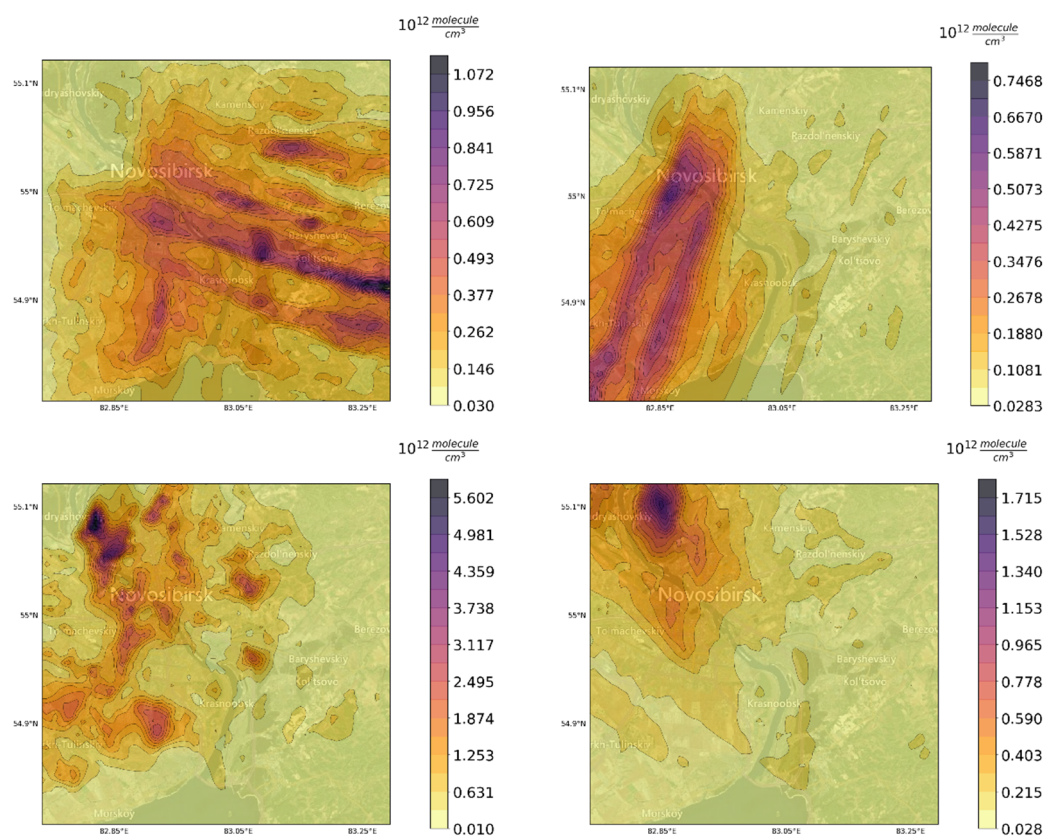


Рис. 6. Средние за день концентрации NO по восстановленным источникам

Обсуждение

Из рис. 4 видно, что в относительных величинах ошибка восстановления источника доходит до 80 %. Сравнивая рис. 1 и рис. 3 можно заметить, что прежде всего теряется «тонкая структура» распределения источников. Идентифицируется общее очертание дорожной сети и «центр» города. Точность восстановления ненаблюдаемого поля концентраций (рис. 6) существенно выше. Зависимость точности восстановления от метеосценария также сильнее выражается в задаче продолжения (рис. 4, б). Следуя оценке на основе анализа оператора чувствительности (рис. 4, в и рис. 5), результат потенциально можно несколько улучшить. Как можно судить по рис. 4, а, непосредственное решение обратной задачи занимает достаточно большое время, поэтому оценка на основе проекции (рис. 5) представляется перспективной для сравнения различных сетей мониторинга.

Заключение

Таким образом, в рассмотренных сценариях структура источников от транспортной сети восстанавливается «сглажено» по пространству, теряется «тонкая» структура источников. С лучшим качеством восстанавливаются поля концентра-

ций загрязняющих примесей. Оценка на основе проекций на ортогональное ядро оператора чувствительности позволяет получить экспресс-оценку решения обратной задачи, что можно использовать в задачах оптимизации систем мониторинга.

Работа поддержана РФФИ и Правительством Новосибирской области в рамках научного проекта № 19-47-540011 (сценарный поход для города Новосибирска) и РФФИ № 20-01-00560 в части анализа задачи продолжения. Данные об интенсивности дорожного движения предоставлены компанией 2Gis.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Stewart D.R., Saunders E., Perea R.A., Fitzgerald R., Campbell D.E., Stockwell W.R. Linking Air Quality and Human Health Effects Models: An Application to the Los Angeles Air Basin // Environmental Health Insights. – 2017. – Vol. 11. – P. 117863021773755.
2. Gochakov A.V., Penenko A.V., Antokhin P.N., Kolker A.B. Air pollution modelling in urban environment based on a priori and reconstructed data // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 211. – P. 012050.
3. Пененко В.В., Рапута В.Ф., Быков А.В. Планирование эксперимента в задаче оценивания мощности источников примеси // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1985. – Т. 21. – С. 913-920.
4. Пененко В.В., Пененко А.В., Цветова Е.А., Гочаков А.В. Методы исследования чувствительности модели качества атмосферы и обратные задачи геофизической гидротермодинамики // Прикладная механика и техническая физика. – 2019. – Т. 6. – С. 238-246.
5. Penenko A. Convergence analysis of the adjoint ensemble method in inverse source problems for advection-diffusion-reaction models with image-type measurements // Inverse Problems & Imagin g. – 2020. – Vol. 14. – P. 757–782.
6. Bieringer P.E., Young G.S., Rodriguez L.M., Annunzio A.J., Vandenberghe F., Haupt S.E. Paradigms and commonalities in atmospheric source term estimation methods // Atmospheric Environment. – 2017. – Vol. 156. – P. 102–112.
7. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X.Y., Wang W., Powers J.G. A Description of the Advanced Research WRF Version 3, Boulder, Colorado, USA, Jun 2008. [Electronic resource]. – Mode of access: <http://dx.doi.org/10.5065/D68S4MVH> (дата обращения: 17.05.2021).
8. Hundsdorfer W., Verwer J.G. Numerical Solution of Time-Dependent Advection-Diffusion-Reaction Equations. – Berlin Heidelberg : Springer, 2013. – 478 с.
9. О состоянии и об охране окружающей среды Новосибирской области в 2015 году, Новосибирск, Государственный доклад 2016. [Electronic resource]. – Mode of access: http://www.nso.ru/sites/test.new.nso.ru/wodby_files/files/wiki/2014/01/korrektura_gosdoklad-2015.compressed.pdf (дата обращения: 17.05.2021).

© А. В. Пененко, А. В. Гочаков, 2021