

Научная статья

УДК 519.6

DOI 10.25205/1818-7900-2024-22-1-21-30

Структура информационно-вычислительной системы для решения задачи усвоения данных при моделировании окружающей среды

**Василий Дмитриевич Котлер¹, Марина Владимировна Платонова²
Екатерина Георгиевна Климова³**

Федеральный исследовательский центр информационных
и вычислительных технологий
Новосибирск, Россия

² v.kotler@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4359-8922>

Аннотация

В условиях быстрого роста объема информации и доступности вычислительных мощностей тема создания информационно-вычислительных систем (ИВС) становится более актуальной, чем когда-либо. В данной статье представлено описание разработанной ИВС для оценки потоков парниковых газов с поверхности Земли с помощью методов усвоения данных. Обсуждаются архитектурные и технические решения, а также специфика адаптации системы ИВС под используемую модель MOZART-4 и данные со спутника AIRS. Также освещены математические основы и представлен пример алгоритма, применяемого в конкретном случае ИВС – алгоритм ансамблевого фильтра Калмана LETKF.

Ключевые слова

информационно-вычислительная система, усвоение данных, среда моделирования

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий.

Благодарности

Авторы статьи выражают глубокую благодарность коллегам профессору Анатолию Алексеевичу Лагутину и доценту Егору Юрьевичу Мордвину за предоставленные данные и полезные дискуссии.

Для цитирования

Котлер В. Д., Платонова М. В., Климова Е. Г. Структура информационно-вычислительной системы для решения задачи усвоения данных при моделировании окружающей среды // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2024. Т. 22, № 1. С. 21–30. DOI 10.25205/1818-7900-2024-22-1-21-30

© Котлер В. Д., Платонова М. В., Климова Е. Г., 2024

Structure of an Information and Computing System for Solving the Problem of Data Assimilation in Environmental Modeling

Vasily D. Kotler¹, Marina V. Platonova²
Ekaterina G. Klimova³

Federal Research Center for Information and Computational Technologies
Novosibirsk, Russian Federation

²v.kotler@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4359-8922>

Abstract

The article presents the development and implementation of an information-computational system (ICS) specifically designed for assessing greenhouse gas fluxes from the Earth's surface using data assimilation methods. This system effectively interfaces with the MOZART-4 chemical transport model and utilizes satellite data from AIRS, ensuring accurate and reliable estimations of gas fluxes. At the core of this system lies the application of the ensemble Kalman filter algorithm, LETKF, for methane flux estimation, enabling the consideration of uncertainties in both data and model representations. The paper extensively discusses the architectural and technical solutions employed, emphasizing the necessity of adapting the system to the intricacies of the utilized model, thereby enhancing result accuracy. Furthermore, it elaborates on the mathematical foundations of the methodology and includes a practical demonstration of the algorithm's application within the information-computational system framework. The findings of this research hold significant value as they pave the way for further advancements in utilizing such systems for environmental modeling and data assimilation endeavors, contributing to our understanding and management of the Earth's environment.

Keywords

information computing system, data assimilation, modeling environment

Funding

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Russian Ministry of Education and Science for the Federal Research Center for Information and Computing Technologies.

Acknowledgements

The authors of the article express their gratitude to their colleagues Professor Anatoly Alekseevich Lagutin and Associate Professor Egor Yurievich Mordvin for the data provided and useful discussions.

For citation

Kotler V. D., Platonova M. V., Klimova E. G. Structure of an information and computing system for solving the problem of data assimilation in environmental modeling. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2024, vol. 22, no. 1, pp. 21–30 (in Russ.) DOI 10.25205/1818-7900-2024-22-1-21-30

Введение

Моделирование окружающей среды является актуальным направлением современной науки. Научные исследования в этой области позволяют не только понять процессы, происходящие в окружающей среде, но и прогнозировать их изменения в будущем. Однако, несмотря на значительные достижения в области моделирования, существуют определенные ограничения, связанные с невозможностью полного учета всех факторов, влияющих на окружающую среду. Например, математические модели не всегда могут в полной мере учитывать различные экстремальные события, такие как природные катаклизмы или антропогенные аварии, а также их последствия для окружающей среды.

Важным инструментом, используемым для оценки состояния окружающей среды, является подход, называемый усвоением данных с применением математической модели исследуемого процесса. Усвоение данных представляет собой подход, позволяющий объединить информацию из различных источников, таких как наблюдения и данные прогноза по математической модели, для получения наиболее точной оценки исследуемых параметров окружающей среды [13]. Таким образом, моделирование окружающей среды и усвоение данных играют важную

роль в научном понимании процессов, происходящих в природной среде, и могут использоваться для принятия решений в области охраны окружающей среды и устойчивого развития.

Изменению климата уделяется в настоящее время большое внимание [4]. Известно, что парниковые газы, в первую очередь углекислый газ и метан, оказывают существенное влияние на климат. Поиск и оценка источников и эмиссии парниковых газов являются приоритетной задачей для научного сообщества. Этот интерес обусловлен не только научными исследованиями, но и политическими и экономическими факторами.

Исследование эмиссии парниковых газов, в частности метана, представляет собой задачу глобального характера и имеет высокую степень сложности. Моделирование атмосферы и учет ее характеристик являются ключевыми для данного процесса. Сложность задачи неизбежно возрастает с увеличением масштаба и детализации модели атмосферы [1; 5; 6]. Исследования стимулируют создание и развитие новых моделей, а также введения в эксплуатацию большего числа новых приборов для точного измерения концентрации парниковых газов.

Внедрение современных измерительных устройств как на поверхности Земли, так и из космоса, значительно расширяет возможности сбора данных о составе атмосферы. Рост объема данных измерений наряду с созданием более точных моделей атмосферных процессов приводит к новым проблемам, связанным с хранением и обработкой информации. Для эффективного анализа этой информации и использования ее при моделировании необходимы современные информационно-вычислительные системы, способные обрабатывать, хранить и организовывать данные для проведения разнообразных экспериментов [4; 7].

Необходимость разработки информационно-вычислительной системы (ИВС) для усвоения данных обусловлена несколькими ключевыми аспектами [6]. Во-первых, с увеличением объемов данных, собираемых с различных источников, становится критически важным иметь удобные инструменты для работы с системой усвоения данных. Это включает в себя возможности эффективного доступа к данным, их обработки и оперативного анализа, а также визуализации результатов работы системы усвоения данных. Во-вторых, оптимизация и структуризация больших объемов исходных данных играют ключевую роль в успешной работе системы усвоения данных. Необходимо обеспечить эффективное хранение и управление данными, а также разработать методы и алгоритмы для их предварительной обработки и фильтрации. В-третьих, создание информационно-вычислительной системы (ИВС) является важным для научного сообщества, так как создание данного инструмента – это создание простого и понятного интерфейса для запуска моделей, проведения численных экспериментов с различными параметрами и условиями. Создание такого инструмента даст возможность ученым из смежных областей проверки своих гипотез и апробации различных климатических сценариев.

Важным аспектом в разработке информационно-вычислительных систем (ИВС) является их универсальность, т. е. способность применяться для различных математических моделей и типов данных. Также не менее важным свойством является переносимость системы на другие вычислительные средства, что обеспечивает ее функциональность и применимость в различных сценариях использования.

В связи с развитием информационно-вычислительной техники, в том числе и в нашей стране, наблюдается рост исследований в области разработки информационно-вычислительных систем для реализации задач математического моделирования, связанных с вычислениями на длительные сроки и использованием больших объемов информации. Так, в Институте вычислительной математики (ИВМ РАН) с 2005 по 2007 г. под руководством Г. И. Марчука и В. И. Агошкова выполнялся проект по разработке информационно-вычислительной системы усвоения данных, основанной на вариационном подходе, с целью анализа гидрофизических полей в океане и их расчетов [6].

В рамках исследований, проведенных И. В. Бычковым, Г. М. Ружниковым, Р. К. Фёдоровым с коллегами, были представлены два значимых проекта в области информационных технологий. Кроме того, в 2016 г. была разработана информационная система, способная пла-

нирывать и выполнять композиции веб-сервисов в гетерогенной динамической среде. Этот проект имеет большое значение для развития эффективного и гибкого использования веб-сервисов в различных приложениях, что способствует повышению производительности и удобства для пользователей [7; 8].

В статье описывается разрабатываемая авторами ИВС для задачи оценки потоков парниковых газов с поверхности Земли с применением методов усвоения данных. Реализация ИВС осуществляется для химической транспортной модели MOZART-4 и спутниковых данных AIRS. При этом на основе алгоритма ансамблевого фильтра Калмана LETKF производится оценка потоков парникового газа метана. Приводится также краткое описание задачи усвоения данных, рассматривается структура ИВС для задачи оценки потоков парниковых газов, анализируются способы реализации данной ИВС.

Задача усвоения данных при моделировании окружающей среды

Оценка состояния окружающей среды по данным наблюдений является одной из наиболее актуальных задач в настоящее время. Такая оценка проводится с привлечением прогностических моделей на основе систем усвоения данных. Под усвоением данных («data assimilation») принято понимать совместный учет данных и математической модели для наиболее точной оценки пространственно-временного распределения исследуемых величин [13]. Существует огромное количество методик усвоения данных, но, с точки зрения математической постановки задачи, все они используют один из двух подходов: вариационный или динамико-стохастический [3]. Поскольку данные наблюдений известны с ошибками, имеющими случайный характер, все методы усвоения должны учитывать статистические свойства ошибок измерений. Статистический характер имеют также так называемые «шумы» моделей, учет которых важен при проведении оценки состояния окружающей среды. Проблема учета статистических характеристик ошибок прогноза и наблюдений естественным образом решается при применении динамико-стохастического подхода (фильтр Калмана). Численная реализация фильтра Калмана для современных нелинейных моделей невозможна, поэтому в настоящее время используются различные приближения. Лидирующее положение занимает ансамблевый подход, при котором ковариации ошибок прогноза оцениваются с помощью ансамбля прогнозов по возмущенным начальным полям. Реализация ансамблевого подхода также содержит технологические сложности, связанные, в частности, с большой размерностью рассматриваемых при этом матриц [9; 10].

Изучение распространения в пространстве и времени парниковых газов, а также оценка потоков с поверхности Земли этих газов представляет одну из задач мониторинга состояния окружающей среды. Для решения этой задачи принято использовать системы усвоения данных, включающие в себя данные наблюдений и математическую модель распространения газовых составляющих в атмосфере [1; 11]. Реализация алгоритма усвоения данных для современных глобальных моделей с использованием больших объемов данных представляет собой сложную технологическую задачу, требующую разработки соответствующей ИВС.

ИВС «Оценка потоков парниковых газов по спутниковым данным»

В данном разделе статьи описана структура ИВС «Оценка потоков парниковых газов по спутниковым данным» для реализации системы усвоения данных. В ИВС используются результаты расчета прогноза по химической транспортной модели MOZART-4 в заданные моменты времени, а также спутниковые данные AIRS, в частности расчет ведется для концентрации метана.

Модель MOZART-4 (Model for Ozone and Related chemical Tracers, version 4) представляет собой трехмерную транспортную модель, разработанную для моделирования распростране-

ния атмосферных примесей, включая парниковые газы, озон и другие химические компоненты. Эта модель позволяет проводить прогнозы состояния атмосферы на различных временных и пространственных масштабах [5; 12; 6].

Спутниковые данные AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) предоставляют обширную информацию, в том числе информацию о вертикальном профиле температуры и концентрации парниковых газов в атмосфере. Эти данные получаются с помощью специализированных приборов на борту спутников и представляют собой ценный источник информации для мониторинга и исследования атмосферных процессов [5; 12; 6].

В настоящее время в информационно-вычислительной системе используется алгоритм усвоения данных LETKF, основанный на ансамблевом фильтре Калмана (Ensemble Kalman Filter). Особенностью данного алгоритма является локальность, что упрощает вычисления. В частности, это позволяет проводить более простые вычисления и снижает вычислительную сложность системы, сохраняя при этом достаточную точность и эффективность процедуры оценки потоков парниковых газов [1; 11].

Реализация ИВС «Оценка потоков парниковых газов по спутниковым данным»

При разработке ИВС особое внимание уделяется ее архитектуре, которая должна позволять обрабатывать большие объемы данных, обеспечивать безопасное масштабирование системы и обновление функционала, а также обладать удобным пользовательским интерфейсом. Серверная часть информационно-вычислительной системы реализована на языке Python. Этот выбор обусловлен не только его надежностью и стабильностью, но и широким сообществом пользователей и разработчиков, что обеспечивает поддержку и доступ к различным ресурсам, необходимым для успешной реализации информационной системы. Python является одним из наиболее простых и распространенных языков в области научных исследований, что делает его выбор оптимальным для создания ИВС. Архитектура ИВС строится с учетом доступности модели MOZART-4 для установки и использования (исходный код модели находится в открытом доступе).

В процессе экспериментов все ансамблевые вычисления проводились с использованием стандартной linux-утилиты – xargs. Ее использование позволяет выполнять вычисления и обработку данных параллельно, что не только экономит время, но и оптимизирует использование пространства на диске. Это обеспечивает эффективность и масштабируемость работы информационной системы, что важно для обработки и анализа больших объемов данных, характерных для исследований в области моделирования окружающей среды, и усвоения данных [7]. Подробное описание информационно-вычислительной системы представлено на рис. 1.

Система состоит из нескольких ключевых компонентов, каждый из которых выполняет определенные функции в процессе обработки и анализа данных. Первым блоком является основная структура, включающая в себя элементы для передачи информации и управления выполнением внутренними процессами. Эти компоненты отвечают за передачу данных и управление процессом обработки, обеспечивая целостность и надежность системы. Далее следует блок предварительной обработки данных, где входящие спутниковые данные (спутник AIRS) и результаты вычислений прогнозов по модели MOZART-4 подвергаются предварительной обработке для дальнейшего анализа. Далее следует блок вычислений, где происходит сбор и структурирование данных и дальнейшая обработка результатов. После процедуры обработки результаты сохраняются в базе данных для общего доступа и использования. На этапе поиска оценки эмиссии парниковых газов осуществляется итеративный процесс усвоения данных с учетом различных параметров задачи усвоения данных.

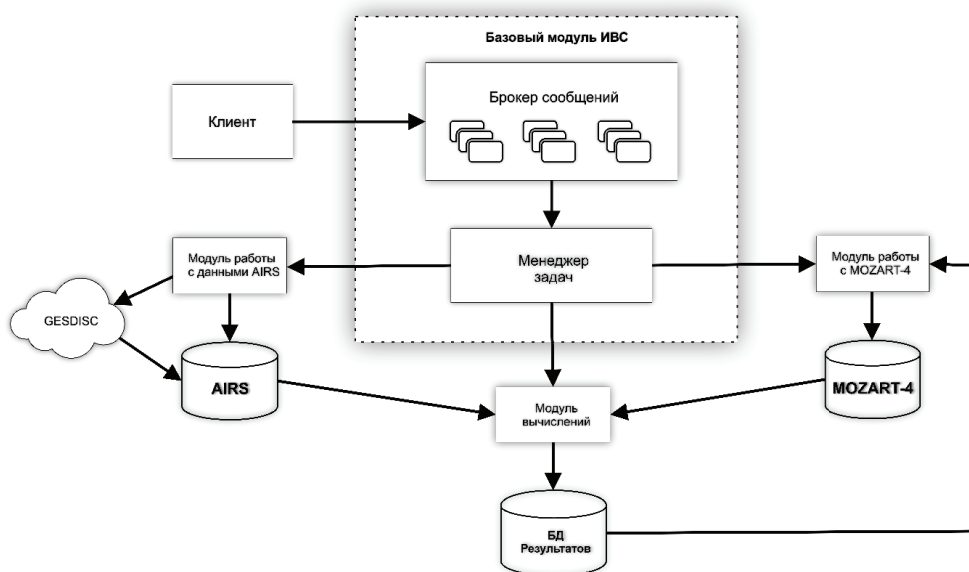


Рис. 1. Блок-схема системы «Оценка потоков парниковых газов по спутниковым данным»
 Fig. 1. Block diagram of the system “Estimation of greenhouse gas flows from satellite data”

В блоке баз данных системы усвоения данных предусмотрено хранение информации, полученной как из спутниковых наблюдений, так и результатов расчетов математической модели. Исходные данные, в том числе данные спутниковых наблюдений, и результаты расчетов поступают в ИВС в файлах с расширениями HDF (Hierarchical Data Format) и NetCDF (Network Common Data Form). В процессе работы системы на различных этапах предобработки необходимая информация считывается из этих файлов и загружается в базы данных. Это позволяет не только хранить информацию в структурированном и удобном формате, но и обеспечивает оперативный доступ к данным для дальнейшего анализа и использования. Использование баз данных обеспечивает не только возможность проведения статистических анализов за большие периоды времени, но также обеспечивает оперативный доступ к данным, что является важным аспектом в работе системы усвоения данных. Это позволяет специалистам быстро получать доступ к необходимой информации для принятия решений и анализа текущего состояния атмосферы и изменений в ней.

Важной частью процедуры обработки и анализа информации является использование математически алгоритмов усвоения данных. В разрабатываемой ИВС используется алгоритм, основанный на ансамблевом фильтре Калмана. Его использование позволяет оценивать потоки парниковых газов и предсказывать их изменения в зависимости от различных факторов, таких как изменения климата, антропогенная активность и естественные процессы [1; 10].

Следует отметить особенность реализации системы усвоения данных, связанную с использованием параллельных вычислений. Одной из ключевых характеристик используемого алгоритма усвоения данных является его локальность, что позволяет применять этот алгоритм для каждого узла сетки модели независимо друг от друга. Это обеспечивает возможность применения распараллеливания процессов и распределенных вычислений. Использование параллельных вычислений позволяет системе обрабатывать большие объемы данных более эффективно и быстро, разделяя задачи на независимые подзадачи и выполняя их параллельно на вычислительных ядрах процессора. Такой подход значительно ускоряет процесс усвоения данных и позволяет обрабатывать данные в реальном времени или в короткие сроки. Кроме того, алгоритм усвоения данных основан на ансамблевом фильтре Калмана, поэтому важной

частью реализации алгоритма является вычисление ансамбля прогнозов по модели на заданные сроки по времени по возмущенным начальным данным (порядка 20–100). Вычисление ансамблей производится независимо друг от друга и также требует параллельных вычислений для повышения эффективности алгоритма. Таким образом, возможность применения параллельных вычислений в системе усвоения данных обеспечивает большую гибкость и эффективность в обработке информации.

Центральным элементом реализации ИВС являются программные интерфейсы, через которые осуществляется взаимодействие между различными компонентами системы. Это обеспечивает эффективную передачу данных и совместную работу всех элементов. Для удобства пользователей созданы интуитивно понятные инструменты для работы с системой. Это позволяет легко управлять процессом анализа данных, вводить необходимые параметры и анализировать полученные результаты.

На рис. 2, 3 представлены страницы интерфейса для настройки процесса ИВС «Оценки потоков парниковых газов по спутниковым данным». На рис. 2 показаны параметры настройки: выбор модели, определение сетки моделирования, указание временного промежутка эксперимента и выбор типа данных для анализа и т. д. Далее эти параметры передаются в вычислительный модуль для обработки (см. рис. 3).

Рис. 2. Введение параметров

Fig. 2. Entering parameters

Рис. 3. Передача параметров в вычислительный модуль для обработки

Fig. 3. Transfer to the computing module for processing

Результаты могут быть представлены на сервере системы для дальнейшего использования или сразу визуализированы с помощью интерфейса ИВС, что обеспечивает оперативный доступ к результатам. Важно, что разрабатываемая информационно-вычислительная система обладает универсальными характеристиками. Это означает, что ее функционирование не зависит от конкретных моделей или источников данных, которые могут быть использованы в системе. В дальнейшем возможно использование в ИВС других моделей и данных измерений. Это открывает широкие перспективы для внедрения различных научных исследований и приложений, а также для адаптации системы к различным условиям и потребностям пользователей.

Благодаря клиент-серверной архитектуре разрабатываемой системы доступ к интерфейсу и клиентской части будет доступен через интернет с помощью любого браузера. После процедуры регистрации пользователи смогут создавать и добавлять в очередь процессы для обработки на сервер системы. Кроме того, серверную часть можно перенести на другие вычислительные устройства с любой операционной системой, так как она не имеет специфичных вычислительных или программных элементов. Это обеспечивает удобство использования системы, так как она может быть адаптирована под различные инфраструктуры и потребности пользователей без необходимости значительных изменений. Возможность переноса на другие ПК и легкая масштабируемость системы обеспечивают ее доступность и удобство применения для пользователей из различных точек мира.

Заключение

В статье представлена общая структура разрабатываемой ИВС «Оценка потоков парниковых газов по спутниковым данным».

На данный момент разработка информационно-вычислительной системы для анализа потоков парниковых газов с поверхности Земли прошла несколько ключевых этапов.

- Проведен тщательный анализ существующих подходов к решению основной задачи. Кроме анализа литературы, изучены методы и алгоритмы, применяемые в схожих проектах и исследованиях.
- Разработана блок-схема и архитектура информационно-вычислительной системы, включая определение основных компонентов системы, их взаимосвязей и организации процесса обработки данных.
- Разработаны алгоритмы взаимодействия между подсистемами и обмена данными между ними. Это позволило оптимизировать процессы обработки и анализа информации, а также обеспечить эффективное взаимодействие между различными компонентами системы.
- Начата работа по организации пользовательского интерфейса информационно-вычислительной системы, что включает в себя создание макетов интерфейса и разработку алгоритмов взаимодействия с пользователем, чтобы обеспечить удобство использования системы.

Все этапы разработки выполнены с учетом научных принципов и методов. Разработанные алгоритмы позволили более эффективно проводить численные эксперименты по усвоению спутниковых данных с использованием глобальной химической модели.

Список литературы

1. **Klimova E. G.** Methods of estimation of greenhouse gases concentration in the atmosphere using observations and transport and diffusion model, based on the ensemble Kalman filter // All-Russian Conference "Spatial Data Processing for Monitoring of Natural and Anthropogenic Processes, SDM 2017". 2017. Vol. 2033. P. 191–195.

2. **Bocquet M.** Data assimilation in atmospheric chemistry models: current status and future prospects for coupled chemistry meteorology models // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2014. Vol. 14.
3. **Nakamura G., Potthast R.** Inverse Modeling. IOP Publishing Ltd., 2015.
4. **Бондур В. Г., Савин А. И.** Концепция создания систем мониторинга окружающей среды в экологических и природно-ресурсных целях // *Исследование Земли из космоса*. 1992. № 6. С. 70–78.
5. **Mordvin E. Y., Lagutin A. A.** Methane in the atmosphere of Western Siberia. Barnaul, 2016.
6. **Lagutin A. A., Mordvin E. Yu., Volkov N. V.** Methane emission by petroleum industry in Western Siberia according to satellite observations Proc. SPIE 11916, 27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics Atmospheric Physics, 119166N. DOI: 10.1117/12.2603438
7. **Baner P.** The digital revolution of Earth-system science // *Nature Computational Science*. 2021. Vol. 1. P. 10–113.
8. **Агошков В. И., Ботвиновский Е. А., Гусев А. В., Кочуров А. Г., Лебедев С. А., Пармузин Е. И., Шутяев В. П.** Информационно-вычислительная система вариационной ассимиляции данных измерений ИВС-T2. М.: Изд-во СО РАН, 2008.
9. **Бычков И. В.** Инфраструктура информационных ресурсов и технологии создания информационно-аналитических систем территориального управления. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016.
10. **Bychkov I., Oparin G., Tchernykh A., Feoktistov A., Bogdanova V., Dyadkin Yu., Andrukova V., Basharina O.** Simulation Modeling in Heterogeneous Distributed Computing Environments to Support Decisions Making in Warehouse Logistics // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 201. P. 524–533.
11. **Evensen G.** Data assimilation. The ensemble Kalman filter, Heideberg:Springer, Verlag, Berlin, 2009.
12. **Климова Е. Г.** Экономичный алгоритм стохастического ансамблевого сглаживания // *Сибирский журнал вычислительной математики*. 2020. № 23(4). С. 381–390.
13. **Platonova M. V., Klimova E. G.** An algorithm for estimating greenhouse gas fluxes using satellite data for a global transport and diffusion model // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. № 1715(1). P. 012021.
14. **Lagutin A. A., Mordvin E. Yu., Volkov N. V.** Regression model for reconstruction of the total methane content according to the data from AIRS hyperspectrometer and chemical transport model MOZART-4 Proc. SPIE 12780, 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics, 1278062.

References

1. **Klimova E. G.** Methods of estimation of greenhouse gases concentration in the atmosphere using observations and transport and diffusion model, based on the ensemble Kalman filter. *All-Russian Conference "Spatial Data Processing for Monitoring of Natural and Anthropogenic Processes, SDM 2017"*, 2017, vol. 2033, pp. 191–195.
2. **Bocquet M.** Data assimilation in atmospheric chemistry models: current status and future prospects for coupled chemistry meteorology models. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 2014, vol. 14.
3. **Nakamura G., Potthast R.** Inverse Modeling. IOP Publishing Ltd., 2015.
4. **Bondur V. G., Savin A. I.** The concept of creating environmental monitoring systems for environmental and natural resource purposes. *Earth Research from Space*, 1992, № 6, pp. 70–78. (in Russ.)
5. **Mordvin E. Y., Lagutin A. A.** Methane in the atmosphere of Western Siberia. Barnaul, 2016.

6. **Lagutin A. A., Mordvin E. Yu., Volkov N. V.** Methane emission by petroleum industry in Western Siberia according to satellite observations *Proc. SPIE 11916, 27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics Atmospheric Physics*, 119166N. DOI: 10.1117/12.2603438
7. **Baner P.** The digital revolution of Earth-system science. *Nature Computational Science*, 2021, vol. 1, pp. 10–113.
8. **Agoshkov V. I., Botvinovsky E. A., Gusev A. V., Kochurov A. G., Lebedev S. A., Parmuzin E. I., Shutyaev V. P.** Information and computing system for variational assimilation of measurement data IVS-T2, Moscow, 2008. Publishing house of the Siberian branch of sciences, 2008. (in Russ.)
9. **Bychkov I. V.** Infrastructure of information resources and technologies for creating information and analytical systems for territorial management. Novosibirsk, Publishing house of the Siberian branch of sciences, 2016.
10. **Bychkov I., Oparin G., Tchernykh A., Feoktistov A., Bogdanova V., Dyadkin Yu., Andrukova V., Basharina O.** Simulation Modeling in Heterogeneous Distributed Computing Environments to Support Decisions Making in Warehouse Logistics. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 201, pp. 524–533.
11. **Evensen G.** Data assimilation. The ensemble Kalman filter, Heidelberg: Springer, Verlag, Berlin, 2009.
12. **Klimova E. G.** Economical algorithm for stochastic ensemble smoothing. *Siberian Journal of Computational Mathematics*, 2020, vol. 23(4), pp. 381–390. (in Russ.)
13. **Platonova M. V., Klimova E. G.** An algorithm for estimating greenhouse gas fluxes using satellite data for a global transport and diffusion model. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, no. 1715(1), pp. 012021.
14. **Lagutin A. A., Mordvin E. Yu., Volkov N. V.** Regression model for reconstruction of the total methane content according to the data from AIRS hyperspectrometer and chemical transport model MOZART-4 *Proc. SPIE 12780, 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics*, 1278062.

Сведения об авторах

Котлер Василий Дмитриевич, младший научный сотрудник

Платонова Марина Владимировна, младший научный сотрудник
Researcher ID WoS: AFI-8086-2022

Климова Екатерина Георгиевна, доктор физико-математических наук
Researcher ID WoS: S-5641-2016

Information about the Authors

Vasily D. Kotler, Junior Researcher

Marina V. Platonova, Junior Researcher
Researcher ID WoS: AFI-8086-2022

Ekaterina G. Klimova, Doctor of Physical and Mathematical Sciences
Researcher ID WoS: S-5641-2016

*Статья поступила в редакцию 24.02.2024;
одобрена после рецензирования 08.04.2024; принята к публикации 08.04.2024*

*The article was submitted 24.02.2024;
approved after reviewing 08.04.2024; accepted for publication 08.04.2024*