

М.І. Ільїн

Інформаційна технологія моніторингу забруднення атмосфери хімічно взаємодіючими домішками з урахуванням їхніх аномальних властивостей

Предложена информационная технология мониторинга процессов загрязнения атмосферы химически взаимодействующими примесями с учетом аномальных процессов самоочищения при достижении предельной концентрации на базе гибридных высокопроизводительных вычислительных систем с использованием графических ускорителей архитектуры *Nvidia CUDA*.

Ключевые слова: информационные технологии мониторинга; загрязнение атмосферы; системы поддержки принятия решений.

Запропоновано інформаційну технологію моніторингу процесів забруднення атмосфери хімічно взаємодіючими домішками з урахуванням аномальних процесів самоочищення при досягненні граничної концентрації на базі гібридних високопродуктивних обчислювальних систем з використанням графічних прискорювачів архітектури *Nvidia CUDA*.

Ключові слова: інформаційні технології моніторингу; забруднення атмосфери; системи підтримки прийняття рішень.

Вступ. Результати дослідження техногенного впливу на атмосферу, моніторингу та моделювання процесів забруднення є одним з ключових факторів у прийнятті рішень в задачах екологічної безпеки, і як наслідок використовуються в управлінні розвитком складних екологічних систем. Техногенний вплив у численних прикладних задачах зводиться до забруднення атмосфери; домінуючий процес – розповсюдження забруднювальної домішки або хімічно взаємодіючих систем домішок.

Особливістю моделей розповсюдження таких домішок в атмосфері є обчислювальна складність – після застосування кінцево-різницевої схем до систем рівнянь дифузії–переносу розмірність отриманих систем лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) швидко зростає за збільшення просторової роздільної здатності моделі [1]. Задача має трансобчислювальну складність, для її розв’язання є актуальним створення нових обчислювальних методів та інформаційних технологій.

Одним із шляхів подолання обчислювальної складності є застосування високопродуктивних обчислювальних систем, а саме гібридних кластерів на базі графічних процесорів архітектури *Nvidia CUDA*, які відрізняються вищою продуктивністю та енергоефективністю порів-

няно з системами без прискорювачів [2, 3]. Відмінності архітектури – в першу чергу суттєво менший обсяг пам’яті та більша кількість обчислювальних ядер – вимагають модифікації існуючих обчислювальних методів [2].

В даній статті запропоновано інформаційну технологію моніторингу забруднення атмосфери хімічно взаємодіючими домішками з урахуванням аномальних процесів самоочищення за досягнення граничної концентрації на базі гібридних високопродуктивних обчислювальних систем з використанням графічних прискорювачів архітектури *Nvidia CUDA*, яка забезпечує можливість застосування спеціальних обчислювальних методів [4] і веде до зменшення використання оперативної пам’яті на 30 відсотків та скорочення часу моделювання в 12 разів.

Модель процесу забруднення та обчислювальна реалізація

В роботі використано модель процесу розповсюдження системи хімічно взаємодіючих домішок з урахуванням аномальних процесів самоочищення [4]. За відсутності аномальних властивостей вона зводиться до відомої *UNIDEM (Unified Danish Eulerian Model)* [5, 6].

Методи обчислювальної реалізації СЛАР високої розмірності, що виникають в задачах

моделювання та параметричної ідентифікації моделі досліджувалися в [4, 7, 8].

Для розв'язання задач моніторингу на базі запропонованих методів створено програмно-апаратний комплекс «Моніторинг», опис якого подано далі.

Компонентна модель системи

Програмно-апаратний комплекс складається з сенсорів, системи агрегації даних, системи збереження, геопросторової бази даних (БД), систем представлення геопросторової інформації, систем візуалізації, керування, організації обчислень та обчислювальної інфраструктури в ролі якої можуть бути використані гібридний кластер з графічними прискорювачами, персональний суперкомп'ютер, традиційний кластер або ґрид середовище (рис. 1).

Як обчислювальну платформу для сенсорів використано мікроконтролер *ESP8266* завдяки низькій вартості, підтримці стеку *TCP/IP*, вбудованого *WiFi*, та можливості розробки програмного забезпечення мовою *Python* (реалізація *MicroPython* [9]). Для передачі даних спостережень крім *WiFi* доступні модулі розширення з підтримкою *ZigBee* та *GSM* за необхідності мобільного застосування – *GPS*. Розроб-

лене програмне забезпечення сенсору здійснює періодичне вимірювання стану середовища, збереження результатів у вбудовану флеш-пам'ять та передачу в систему агрегації даних. При передачі використовується *HTTPS* (модуль *MicroPython urequests*), дані в форматі *json* (модуль *ujson*).

Система агрегації забезпечує збір даних сенсорів, заповнення геопросторової БД та системи збереження. У програмній реалізації використано *Python*, мікроплатформу *Flask* (веб-сервер прийому даних сенсорів), *SQLAlchemy* (взаємодія з БД), модулі *netCDF4-python*, *pyKML* (збереження в форматах *netCDF* та *KML* відповідно). При взаємодії з сервером БД використовується *SQL*. Система збереження підключена до локальної файлової системи.

Для реалізації системи збереження використовується мережеве сховище (за протоколом *NFS*) та *Amazon S3 (s3fs)*, залежно від обсягу оброблюваних даних). При використанні ґрид як обчислювальної інфраструктури зовнішній доступ до системи збереження організовано за протоколом *GridFTP*.

Геопросторові дані сенсорів, історичні дані, інформація про параметри досліджуваної обла-

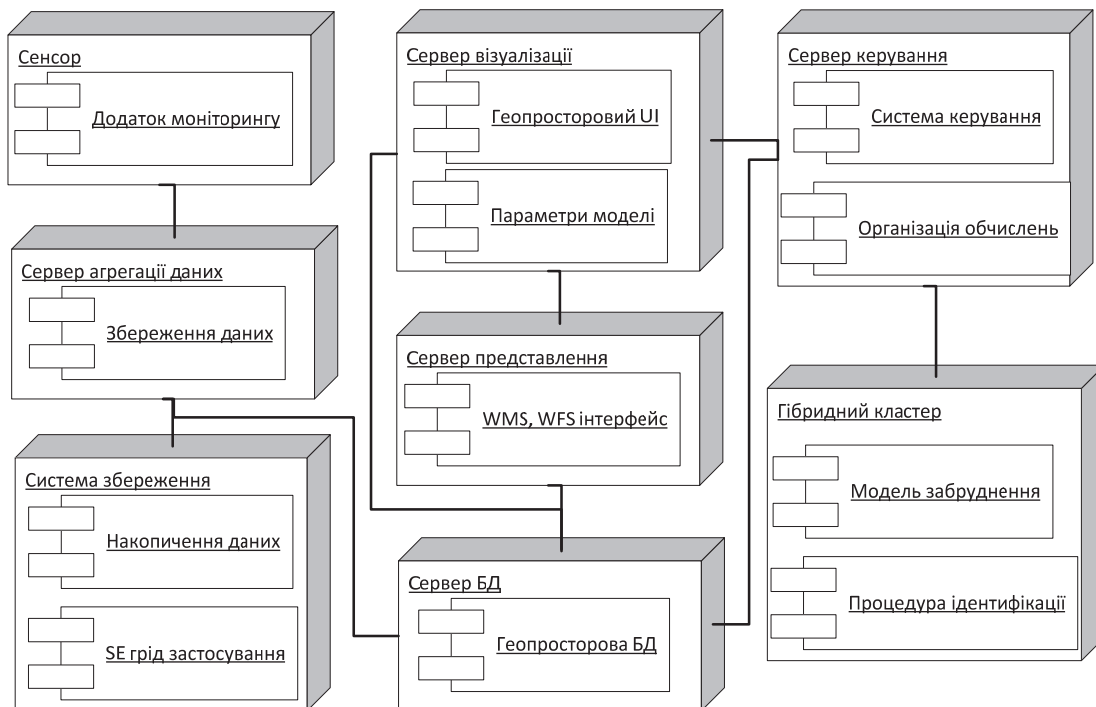


Рис. 1. Діаграма розгортання системи

сті, фізичні характеристики забруднювальних домішок, результати моделювання зберігаються у БД на основі *PostgreSQL* з розширенням *PostGIS* [10], завдяки чому забезпечується прозора обробка геопросторових даних на рівні БД та можливість абстрагування досліджуваних моделей від форматів просторових даних.

Система представлення геопросторових даних забезпечує доступ до вихідних даних та результатів моделювання за протоколами *OGC WMS* та *WFS*. Розділення функцій збереження, представлення та візуалізації даних, використання стандартизованих протоколів *OGC* спрощує інтеграцію запропонованої системи до існуючих систем підтримки прийняття рішень та забезпечує прямий доступ до результатів моніторингу з популярних геоінформаційних систем (*ESRI ArcGIS*, *QGIS* та ін.). Для програмної реалізації використано *MapServer* [11], дані отримують з описаної БД.

Систему візуалізації реалізовано у вигляді веб-сервісу; для доступу досить веб-браузера з підтримкою *HTML5*. Висока продуктивність при візуалізації просторової інформації на стороні клієнта досягається завдяки використанню бібліотеки *OpenLayers*, що інтегрує результати моніторингу і моделювання з системи представлення, супутникові карти з *Google Maps*, дані спостережень інших організацій. Крім візуалізації, в системі можуть бути задані параметри моніторингу та запущений процес моделювання. Відповідний веб-додаток реалізовано на базі *Python Flask* та інтегровано за допомогою *mod_wsgi* до веб-серверу *Apache*.

Система керування отримує параметри моделювання з системи візуалізації, вхідні дані з БД та забезпечує формування обчислювальних завдань для системи організації обчислень. Підтримуються специфікації завдань для систем керування навантаженням кластера *SLURM*, *Torque*; ґрід систем на базі *ARC*, *gLite*, *UMD* та прямий запуск програмної моделі шляхом виконання *mpirun*, *ssh/rxexec*. Сформоване завдання спрямовується до системи організації обчислень, після закінчення моделювання результати заносяться в БД. Для взаємодії систем керування та організації обчислень використовується *ZeroMQ*.

Система організації обчислень забезпечує запуск на виконання обчислювальних завдань, моніторинг виконання та отримання результатів моделювання. Взаємодія з обчислювальними системами здійснюється шляхом прямого запуску утиліт командного рядка систем керування навантаженням кластера та проміжного програмного забезпечення ґрід. При програмній реалізації модуля менеджера завдань використано *Python multiprocessing*, *PyZMQ*.

Програмна реалізація моделі забруднення атмосфери та методів параметричної ідентифікації мовою *C++* із застосуванням *MPI* та розширень компілятора *Nvidia CUDA* визначає вимоги до обчислювальних елементів системи [4, 7]. Необхідна наявність *CUDA toolkit*; в залежності від системи *OpenMPI* (гібридний кластер) або підтримка *OpenMP* (персональний суперкомп'ютер). Розділення системи організації обчислень та обчислювальної інфраструктури дозволяє абстрагувати систему керування обчислювальною інфраструктурою – програмна реалізація моделі не потребує адаптації при перенесенні з гібридного кластера у ґрід або хмарне середовище.

Як операційна система на компонентах програмно-апаратного комплексу використовується *CentOS Linux 7×86_64*.

Застосування комплексу для пошуку інтенсивності джерел забруднення

Розглянемо застосування розробленої системи для розв'язання задачі пошуку інтенсивності джерел забруднювальних домішок [4] за наявності даних вимірювань у режимі реального часу.

Діаграма послідовності наведена на рис. 2. Користувач після авторизації отримує доступ до веб-інтерфейсу системи візуалізації, що відображає останній результат моделювання забруднення, поточні значення сенсорів, мапу області на основі супутникових зображень. Після аналізу динамічно оновлюваного стану розповсюдження забруднювальних домішок користувач запускає процедуру ідентифікації, використовуючи параметри поточної області як вхідні дані моделі. Параметри області передаються в систему керування, яка формує опис

завдання, передає його на виконання, отримує результати, оновлює БД та викликає оновлення статусу системи візуалізації. Остання додає результати оцінки до опису джерел викидів. Користувач повторно аналізує динамічно оновлюваний стан забруднення та може повторити процедуру ідентифікації.



Рис. 2. Діаграма послідовності для задачі ідентифікації інтенсивності джерел забруднення

Описані методи опрацювання, збирання, зберігання, розповсюдження, показу інформації в сукупності з програмно-технічними засобами, описаними в попередньому розділі є інформаційною технологією за певних ознак, таких як використання інформації в інтересах користувачів, забезпечення підтримки інформаційних процесів, цілеспрямованість сукупності процесів обробки і доступу до інформації незалежно від розташування, наявність технологічного ланцюжка виконання інформаційних процесів, що забезпечує зниження трудомісткості процесів використання інформаційних ресурсів та ін.

Висновки. В роботі запропоновано інформаційну технологію моніторингу забруднення атмосфери хімічно взаємодіючими домішками з урахуванням аномальних процесів самоочищення за досягнення граничної концентрації, на базі гібридних високопродуктивних обчис-

лювальних систем з використанням графічних прискорювачів архітектури *Nvidia CUDA* і веде до зменшення використання оперативної пам'яті на 30 відсотків та скорочення часу моделювання в 12 разів. Наведено опис реалізації програмно-апаратного комплексу «Моніторинг», та проілюстровано приклад застосування для задачі ідентифікації інтенсивності джерел забруднення в режимі реального часу.

Подальший напрямок дослідження пов'язаний з розширенням можливостей обробки результатів моніторингу в системі візуалізації даних.

1. Згуровский М.З., Новиков А.Н. Анализ и управление односторонними физическими процессами. – К.: Наук. думка. – 1996. – 328 с.
2. Anzt H., Tomov S., Dongarra J. On the Performance and Energy Efficiency of Sparse Linear Algebra on GPU // *Int. J. of High Performance Computing*. – 2017. – DOI:10.1177/1094342016672081
3. Green500 – <https://www.top500.org/green500/>
4. Ільїн М.І., Новіков О.М. Ідентифікація інтенсивності джерел забруднення атмосфери на базі гібридних обчислювальних систем // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2017. – № 3. – С. 85–89.
5. Zlatev Z., Dimov I. Computational and numerical challenges in environmental modelling. – Oxford: Elsevier. – 2006. – 373 p.
6. UNI-DEM. – <http://www.dmu.dk/AtmosphericEnvironment/DEM/>
7. Ільїн М.І. Модифікація методу обчислювальної реалізації крайових задач на основі Д4-декомпозиції для гібридних систем на базі графічних процесорів // Вісн. НТУУ «КПІ»: Інформатика, управління та обчислювальна техніка. – 2017. – № 2. – С. 10–13.
8. Новіков А.Н. О реализации одного класса вариационных неравенств // *Электронное моделирование*. – 1994. – № 1. – С. 39–45.
9. *MicroPython* for ESP8266. – <https://docs.micropython.org/en/latest/esp8266/>
10. *Querying PostgreSQL/PostGIS databases in Python*. – http://andrewgaidus.com/Build_Query_Spatial_Database/
11. *Python MapScript image generation*. – <http://mapserver.org/mapsript/imagery.html>

Поступила 07.03.2017

Для справок: E-mail: mykola.ilin@pti.kpi.ua

© Н.И. Ильин, 2017

Информационная технология мониторинга загрязнения атмосферы химически взаимодействующими примесями с учетом их аномальных свойств

Введение. Результаты исследования техногенного воздействия на атмосферу, мониторинга и моделирования процессов загрязнения являются одним из ключевых факторов при принятии решений в задачах экологической безопасности, и, как следствие, используются в управлении развитием сложных экологических систем. Техногенное воздействие во многих прикладных задачах сводится к загрязнению атмосферы; доминирующий процесс – распространение загрязняющей примеси или химически взаимодействующих систем примесей.

Особенностью моделей распространения химически взаимодействующих примесей в атмосфере является вычислительная сложность – после применения конечно-разностных схем к системам уравнений диффузии–переноса размерность полученных систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) быстро возрастает при увеличении пространственного разрешения модели [1]. Задача имеет трансвычислительную сложность, для ее решения актуально создание новых вычислительных методов и информационных технологий.

Одно из направлений преодоления вычислительной сложности – применение высокопроизводительных вычислительных систем, а именно гибридных кластеров на базе графических процессоров архитектуры *Nvidia CUDA*, отличающихся высокой производительностью и энергоэффективностью в сравнении с системами без ускорителей [2, 3]. Различия архитектуры – это в первую очередь существенно меньший объем памяти и большее количество вычислительных ядер, требующих модификации существующих вычислительных методов [2].

В данной статье предложена информационная технология мониторинга загрязнения атмосферы химически взаимодействующими примесями с учетом аномальных процессов самоочистки при достижении предельной концентрации на базе гибридных высокопроизводительных вычислительных систем с использованием графических ускорителей архитектуры *Nvidia CUDA*, которая обеспечивает возможность применения специальных вычислительных методов [4], что ведет к уменьшению использова-

ния оперативной памяти на 30 процентов и сокращение времени моделирования в 12 раз.

Модель процесса загрязнения и вычислительная реализация

В работе применяется модель процесса распространения системы химически взаимодействующих примесей с учетом аномальных процессов самоочистки [4]. В случае отсутствия аномальных свойств она сводится к известной *UNI-DEM (Unified Danish Eulerian Model)* [5, 6].

Методы вычислительной реализации СЛАУ высокой размерности, возникающие в задачах моделирования и параметрической идентификации модели исследованы в [4, 7, 8].

Для решения задач мониторинга на базе предложенных методов создан программно-аппаратный комплекс «Мониторинг», описание которого приведено далее.

Компонентная модель системы

Программно-аппаратный комплекс состоит из сенсоров, системы агрегации данных, системы хранения, геопространственной базы данных (БД), системы представления геопространственной информации, систем визуализации, управления, организации вычислений и вычислительной инфраструктуры в качестве которой могут быть использованы гибридный кластер с графическими ускорителями, персональный суперкомпьютер, традиционный кластер или грид (рис. 1).

В качестве вычислительной платформы для сенсоров использован микроконтроллер *ESP8266* благодаря низ-

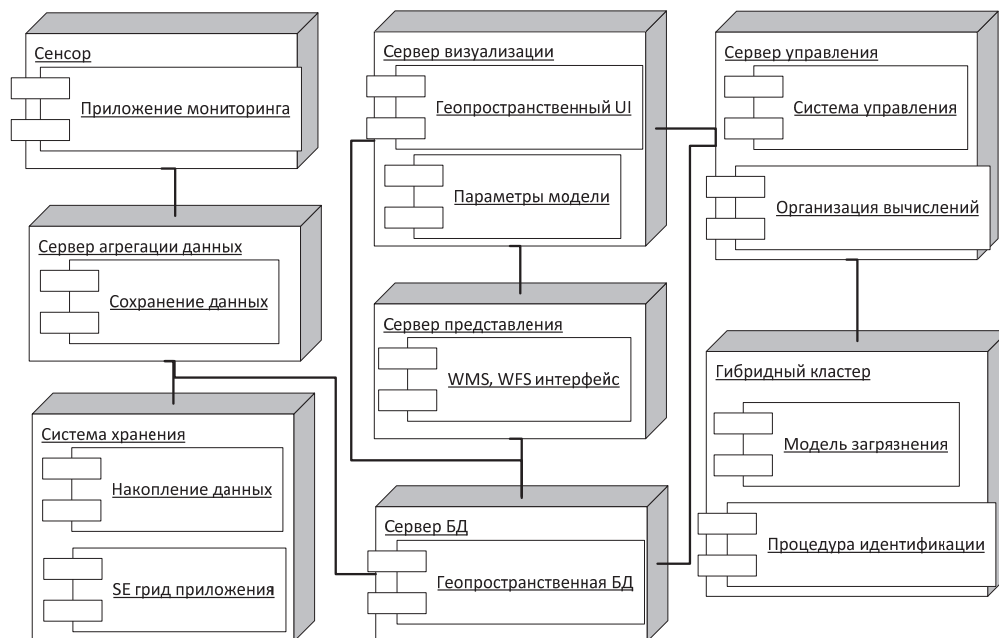


Рис. 1. Диаграмма развертывания системы

кой стоимости, поддержке стека *TCP/IP*, встроенному *WiFi* и возможности разработки программного обеспечения на языке *Python* (реализация *MicroPython* [9]). Для передачи данных наблюдений кроме *WiFi* доступны модули расширения с поддержкой *ZigBee* и *GSM* при необходимости мобильного приложения – *GPS*. Разработанное программное обеспечение сенсора осуществляет периодическое измерение состояния среды, сохранение результатов во встроенную флеш-память и передачу в систему агрегации данных. При передаче используется *HTTPS* (модуль *MicroPython urequests*) и данные в формате *json* (модуль *ujson*).

Система агрегации обеспечивает сбор данных сенсоров, заполнение геопространственной БД и системы хранения. При программной реализации использованы *Python*, микроплатформа *Flask* (веб-сервер приема данных сенсоров), *SQLAlchemy* (взаимодействие с БД), модули *netCDF4-python*, *pyKML* (сохранение в форматах *netCDF* и *KML* соответственно). При взаимодействии с сервером БД используется *SQL*, когда система хранения подключена к локальной файловой системе.

Для реализации системы хранения используется сетевое хранилище (по протоколу *NFS*) и *Amazon S3* (*s3fs*, в зависимости от объема обрабатываемых данных). При использовании грид в качестве вычислительной инфраструктуры внешний доступ к системе хранения организован по протоколу *GridFTP*.

Пространственные данные сенсоров, исторические данные, информация о параметрах исследуемой области, физические характеристики загрязняющих примесей, результаты моделирования сохраняются в БД на основе *PostgreSQL* с расширением *PostGIS* [10]. Благодаря этому обеспечивается прозрачная обработка геопространственных данных на уровне БД и возможность абстрагирования исследуемых моделей от форматов пространственных данных.

Система представления геопространственных данных обеспечивает доступ к исходным данным и результатам моделирования по протоколам *OGC WMS* и *WFS*. Разделение функций хранения, представления и визуализации данных, использование стандартизированных протоколов *OGC* упрощает интеграцию с существующими системами поддержки принятия решений и обеспечивает прямой доступ к результатам мониторинга из популярных геоинформационных систем (*ESRI ArcGIS*, *QGIS* и др.). Для программной реализации использован *MapServer* [11], данные получают из описанной БД.

Система визуализации реализована в виде веб-сервиса; для доступа достаточно веб-браузера с поддержкой *HTML5*. Высокая производительность при визуализации пространственной информации на стороне клиента достигается благодаря использованию библиотеки *OpenLayers*, интегрирующей результаты мониторинга и моделирования из системы представления, спутниковые карты из *Google Maps*, данные наблюдений других организаций. Кроме визуализации в системе могут быть

заданы параметры мониторинга и запущен процесс моделирования. Соответствующее веб-приложение реализовано на базе *Python Flask* и подключено с помощью *mod_wsgi* к веб-серверу *Apache*.

Система управления получает параметры моделирования из системы визуализации, входные данные из БД и обеспечивает формирование вычислительных задач для системы организации вычислений. Поддерживаются спецификации задач для систем управления нагрузкой кластера *SLURM*, *Torque*; грид-систем на базе *ARC*, *gLite*, *UMD*; прямой запуск программной модели путем выполнения *mpirun*, *ssh/rexec*. Сформированная задача отправляется в систему организации вычислений, после окончания моделирования результаты заносятся в БД. Для взаимодействия системы управления и системы организации вычислений используется *ZeroMQ*.

Система организации вычислений обеспечивает запуск на выполнение вычислительных задач, мониторинг выполнения и получения результатов моделирования. Взаимодействие с вычислительными системами осуществляется путем прямого запуска утилит командной строки систем управления нагрузкой кластера и промежуточного программного обеспечения грид. При программной реализации модуля использованы *Python multiprocessing*, *PyZMQ*.

Программная реализация модели загрязнения атмосферы и методов параметрической идентификации на языке *C++* с применением *MPI* и расширений компилятора *Nvidia CUDA* определяет требования к вычислительным элементам системы [4, 7]. Необходимо наличие *CUDA toolkit*, в зависимости от системы *OpenMPI* (гибридный кластер) или поддержка *OpenMP* (персональный суперкомпьютер). Разделение системы организации вычислений и вычислительной инфраструктуры позволяет абстрагировать систему управления вычислительной инфраструктурой – программная реализация модели не требует адаптации при переносе из гибридного кластера в грид или облачную среду.

В качестве операционной системы на компонентах программно-аппаратного комплекса используется *CentOS Linux 7×86_64*.

Применение системы для поиска интенсивности источников загрязнения

Рассмотрим применение разработанной системы для решения задачи поиска интенсивности источников загрязняющих примесей [4] при наличии измерений в режиме реального времени.

Диаграмма последовательности приведена на рис. 2. Пользователь после авторизации получает доступ к веб-интерфейсу системы визуализации, отражающей последний результат моделирования загрязнения, текущие значения датчиков, карту области на основе спутниковых изображений. После анализа динамически обновляемого состояния распространения загрязняющих примесей пользователь запускает процедуру идентификации, используя параметры текущей области в качестве

входных данных модели. Параметры области передаются в систему управления, которая формирует описание задачи, передает на исполнение, получает результаты, обновляет БД и вызывает обновление статуса системы визуализации. Система визуализации добавляет результаты оценки к описанию источников выбросов. Пользователь повторно анализирует состояние загрязнения, и может повторить процедуру идентификации.



Рис. 2. Диаграмма последовательности для задачи идентификации интенсивности источников загрязнения

Описанные методы обработки, сбора, хранения, распространения, показа информации в совокупности с программно-техническими средствами, описанными в предыдущем разделе являются информационной технологией по ряду признаков, таким как использование информации в интересах пользователей, обеспечение поддержки информационных процессов, целеустремленность совокупности процессов обработки и доступа к информации независимо от места расположения, наличие технологической цепочки выполнения информационных процессов, обеспечивает снижение трудоемкости процессов использования информационных ресурсов и др.

Заключение. В работе предложена информационная технология мониторинга загрязнения атмосферы химически взаимодействующими примесями с учетом аномальных процессов самоочищения при достижении предельной концентрации на базе гибридных высокопроизводительных вычислительных систем с использованием графических ускорителей архитектуры *Nvidia CUDA*, ведет к уменьшению использования оперативной памяти на 30 процентов и сокращению времени моделирования в 12 раз. Приведено описание реализации программно-аппаратного комплекса «Мониторинг» и пример применения для задачи идентификации интенсивности источников загрязнения в режиме реального времени.

Дальнейшее направление исследования связано с расширением возможностей обработки результатов мониторинга в системе визуализации данных.

UDC 681.513.675

M.I. Ilin¹

¹ Scientific researcher, National technical university of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Peremohy Ave 37, Kyiv, Ukraine, mykola.ilin@pti.kpi.ua

Information Technology of Monitoring of Atmosphere Pollution by the Chemically-Interacting Contaminants with Anomalous

Keywords: information technologies of monitoring; atmosphere pollution; decision support systems.

Introduction. The tasks of atmospheric monitoring are of great practical importance in the conditions of the constant increase of the intensity of industrial pollution and in emergency situations of technogenic origin. The processing of large volumes of data of various nature, the need to apply distribution models and the computational complexity of modeling in decision support systems determines the importance of the new information technologies creation.

Purpose. The purpose of this research is to develop an information technology for monitoring the processes of atmospheric pollution by systems of chemically interacting contaminants, taking into account anomalous self-purification processes, based on hybrid high-performance computing systems with Nvidia CUDA accelerators.

Methods. System analysis, methods of object-oriented design, parallel processing and parallel algorithms theory are used for information technology development.

Results. The created information technology allows reduction by 30% of memory usage, 12 times reduction of modeling time, simple integration with the existing decision support systems and geo information systems (GIS) because of the standard OGC WMS, WFS interfaces usage. For computational infrastructure, it is possible to use the dedicated hybrid cluster, multi-user HPC resource with the dedicated resource manager, or the grid systems based on ARC, gLite or UMD middleware. For remote sensor implementation it is proposed to use low-cost internet-of-things solution based on ESP8266 microcontroller, which allows future reduction of total system cost (beyond lower FLOPS per watt value of GPGPU computing).

Conclusion. The presented information technology can be used for real-time monitoring of atmosphere pollution processes, allows the integration of the existing decision support systems and GIS.

1. *Zgurovsky M.Z.* Analysis and control of unilateral physical processes, Kiev: Naukova Dumka. – 328 p.
2. *Anzt H., Tomov S., Dongarra J.* On the Performance and Energy Efficiency of Sparse Linear Algebra on GPU // Int. J. of High Performance Computing, 2017, DOI:10.1177/1094342016672081
3. *Green500*. – <https://www.top500.org/green500/>
4. *Ilin M.I., Novikov O.M.* Identification of atmosphere pollution sources intensity with hybrid high performance computing systems, Systems research and information technologies, 2017, N 3. – P. 85–89. (In Ukrainian).
5. *Zlatev Z., Dimov I.* Computational and numerical challenges in environmental modeling, Oxford: Elsevier, 2006, 373 p.
6. *UNI-DEM*. – <http://www.dmu.dk/AtmosphericEnvironment/DEM/>
7. *Ilin M.I.* Modified method of boundary value problems solution based on D4 decomposition for hybrid high performance computing systems // Visnyk NTUU KPI: Informatics, 2017. – P. 10–13. (In Ukrainian).
8. *Novikov O.M.* On implementation of certain class of variation inequalities // Electronic modeling, 1994, N 1. – P. 39–45. (In Russian).
9. *MicroPython* for ESP8266. – <https://docs.micropython.org/en/latest/esp8266/>
10. *Querying PostgreSQL/PostGIS databases in Python*. – http://andrewgaidus.com/Build_Query_Spatial_Database/
11. *Python* MapScript image generation. – <http://mapserver.org/mapscript/imagery.html>



**Для соответствия научно-метрическим базам при подаче статей к рассмотрению,
авторы должны подать метаданные на английском языке:**

- **ФИО**
- место и адрес работы каждого автора
- расширенную аннотацию (до 2000 знаков с пробелами и рубриками:
Introduction, Purpose, Methods, Results, Conclusion)
- список пристатейной литературы в переводе или транслитерации.

**При оформлении списков литературы к расширенной аннотации на
английском языке, можно пользоваться сайтом**

***<http://translit.net>* для русских ссылок**

***<http://ukrlit.org/transliteratsiia>* для украинских.**