

І.В. КОВАЛЕЦЬ*, С.Я. МАЙСТРЕНКО*, Т.О. ДОНЦОВ-ЗАГРЕБА*, С.М. АНУЛІЧ*,
О.В. ХАЛЧЕНКОВ*, К.В. ХУРЦИЛАВА*, О.О. ПОЛОНСЬКИЙ*

WEB-СИСТЕМА ПРОГНОЗУВАННЯ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ УМОВ ДЛЯ ДОВІЛЬНОЇ ТЕРИТОРІЇ НА ДЕТАЛЬНИХ СІТКАХ

*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

Анотація. Розроблено інформаційну веб-технологію, яка дозволяє на замовлення користувача прогнозувати метеорологічні умови по довільній території з високою роздільною здатністю на основі адаптації сучасних метеорологічних моделей та веб-технологій для завдання вхідних даних, отримання й візуалізації результатів.

Ключові слова: прогноз погоди, веб-технології, мезомасштабна метеорологічна модель.

Аннотация. Разработана информационная веб-технология, позволяющая по заказу пользователя прогнозировать метеорологические условия на произвольной территории с высоким разрешением на основе адаптации современных метеорологических моделей и веб-технологий для задания входных данных, получения и визуализации результатов.

Ключевые слова: прогноз погоды, веб-технологии, мезомасштабная метеорологическая модель.

Abstract. It is developed information web technology that allows upon users' request to forecast meteorological conditions at arbitrary territory with high resolution, on the basis of adaptation of modern meteorological model and web-technologies for providing model with input data, obtaining and visualization of results.

Keywords: weather forecasting, web-technologies, mesoscale meteorological model.

1. Вступ

В Україні існує вкрай обмежена кількість оперативних систем прогнозування метеорологічних умов на детальних сітках, рівноцінних світовим аналогам. Згідно з сучасною практикою, такі системи є необхідними для науково обґрунтованого прогнозування та попередження стихійних гідрометеорологічних явищ, забруднення атмосферного повітря та інших завдань, які потребують прийняття рішень щодо ліквідації наслідків аварійних ситуацій і стихійних лих, а також управління навколишнім середовищем. Для розрахунку метеорологічних полів з високою роздільною здатністю в умовах складної топографії місцевості (гірський рельєф, міська забудова, наявність великих водойм тощо) у світі використовуються спеціальні мезомасштабні версії метеорологічних моделей, які враховують вплив складної топографії на атмосферні процеси та розраховують метеорологічні поля з високою горизонтальною просторовою здатністю: 5км–500м. Використання таких систем створює нові можливості щодо прогнозування просторового розподілу метеорологічних параметрів у межах даної території (гірський район, велике місто) і таким чином істотно впливають на завчасність і точність попередження щодо виникнення небезпечних гідрометеорологічних ситуацій та прогнозування рівнів атмосферного забруднення.

Прогноз метеорологічних умов з високою роздільною здатністю є складною обчислювальною задачею, яка потребує великого обсягу обчислювальних ресурсів. Щоб уникнути негативного впливу граничних умов на розв'язок, область розрахунку не може бути занадто малою, і навіть у відносно невеликих областях, наприклад, 200x200 км, прогноз у реальному часі на сітці 3 км потребує від 8 до 32 обчислювальних ядер. Оскільки задача нелінійна, час прогнозу залежить також і від складності метеорологічного процесу. Тому у даний час окремі прогностичні системи (система «WRF-Україна», розроблена в ПІММС [1]), які існують та впроваджені в Українському гідрометцентрі [2, 3], налаштовані тільки

під конкретну обчислювальну область (наприклад, у згаданих вище роботах це деталізовані прогнози по басейну р. Прут та навколо українських АЕС).

Але на практиці досить часто виникає необхідність розробити разовий, а не постійно діючий оперативний прогноз навколо конкретної області, наприклад, під час аварій з викидами токсичних забруднень в атмосферу або під час проходження активних циклонів та фронтів, що викликають небезпечні гідрометеорологічні умови. Відповідно метою даної роботи є розробка інформаційної технології, що дозволяє вирішувати складні задачі аналізу даних та моделювання навколишнього природного середовища на прикладі прогнозування метеорологічних умов по довільній території з високою роздільною здатністю, на основі адаптації сучасних метеорологічних моделей та веб-технологій для завдання вхідних даних, отримання й візуалізації результатів.

2. Автоматизація розрахунку «WRF-Україна» у складі веб-системи метеопрогнозування

Для деталізації глобальних кліматичних сценаріїв по окремій території у всіх європейських країнах і інших країнах світу використовуються чисельні регіональні метеорологічні моделі, які розраховують поля напрямку і сили вітру, тиску і температури, опадів, вологості та ін. на різних висотах на детальній сітці. Таким чином, враховується вплив особливостей місцевості на кліматичні особливості окремого регіону. Як прогностична кліматологічна інформація (сценарії IPCC), так і оперативна прогностична метеорологічна інформація циркулює в мережі центрів ВМО (Всесвітня метеорологічна організація) у вигляді полів метеорологічних елементів, розрахованих на грубій рівномірній сітці (з кроком $0,25^{\circ}$ – 1° , що відповідає відстані приблизно 25–100 км). Це не дозволяє деталізувати прогнози метеорологічних елементів для конкретного пункту з необхідною точністю. На підставі цієї інформації і даних вимірів місцевих метеорологічних станцій у кожній розвинутій країні розраховується прогностична інформація на сітках зі значно меншим просторовим кроком – 1–15 км. Ця задача не може бути вирішена коректно за допомогою простої інтерполяції. Для її розв'язку необхідно вирішити задачу розрахунку метеорологічних полів на підставі даних мережі ВМО, даних місцевих метеостанцій і чисельного розв'язку рівнянь гідротермодинаміки атмосфери [4].

Одним із характерних прикладів мезомасштабної метеорологічної моделі є американська тривимірна чисельна метеорологічна модель WRF [5], яка вільно розповсюджується через Інтернет у вихідних кодах. У даній моделі чисельно розв'язується повна система рівнянь гідротермодинаміки атмосфери, яка включає в себе рівняння нерозривності, перенесення імпульсу (з урахуванням ефектів стисливості і негідростатичності), перенесення вологи і внутрішньої енергії. Користувачеві моделі пропонується бібліотека різних параметризацій процесів у прилеглому шарі атмосфери, формування хмарності та опадів. У моделі реалізовані можливості створювати вкладені обчислювальні області і використовувати алгоритми засвоєння даних спостережень. У WRF використовується σ -система вертикальних координат, яка дозволяє описувати складний рельєф, і «шахова» сітка по горизонталі. При інтегруванні рівнянь гідродинаміки використовується розщеплення за напрямками (у горизонтальних напрямках використовується явна схема, а при обчисленні вертикальних потоків і швидкостей – неявна) і по фізичних процесах. WRF є регіональною моделлю, тому для її ініціалізації і завдання граничних умов необхідні результати розрахунків глобальної моделі чисельного прогнозу погоди. Цикл роботи моделі WRF складається з підготовки даних, включаючи їх горизонтальну і вертикальну інтерполяцію на сітку моделі, поліпшення інтерпольованих даних за допомогою засвоєння спостережень метеостанцій і радіозондів та чисельне інтегрування.

В ІПММС НАН України понад 20 років проводяться дослідження у галузі моделювання атмосферного розповсюдження забруднень, розробки та впровадження метеорологічних моделей для прогнозування погоди, регіональних кліматичних досліджень. На основі розроблених в ІПММС моделей та відомої американської метеорологічної моделі MM5 в ІПММС у 2001 р. розроблена перша в Україні система чисельного прогнозування погоди в Україні. Згодом, на підставі американської метеорологічної моделі WRF (www.wrf-model.org) була розроблена система WRF-Україна [1, 6], яка в даний час впроваджена в Укргідрометцентрі для метеорологічного забезпечення системи РОДОС [3, 7], прогнозування паводків у Карпатах [2, 8], а також у складі інших прогностичних систем. Окрім використання в Україні, система «WRF-Україна» користується попитом у світі. Зокрема, у рамках проекту NERIS-TP 7-ї рамкової програми ЄС дана система інтегрована з системою РОДОС для проведення оперативного розрахунку метеопрогнозу за замовленням користувача у довільній області [6, 9] і була використана під час аварії на АЕС Фукусіма [7, 10].

Розглянемо схему роботи оновленої версії системи, що у даній роботі була адаптована для використання у веб-системі прогнозування метеорологічних умов та представлена на рис. 1. Вхідні дані для розрахунку система отримує в xml-файлі, який містить бажану дату початку розрахунку, тривалість необхідного прогнозу, координати центру області розрахунків, радіус області розрахунків, а також індикатор запуску WRF. Цей xml-файл передається на вхід програмі Wrf-launcher, яка перевіряє, чи є наявності файли для потрібного періоду, якщо ні, то формує завдання для програми Nomadsdownloader, яка завантажує необхідний набір даних із серверів NOMADS [11], що належать NOAA (Національна гідрометслужба США). Після того, як усі дані завантажені, Wrf-launcher вносить зміни в конфігураційні файли моделі WRF і запускає її.

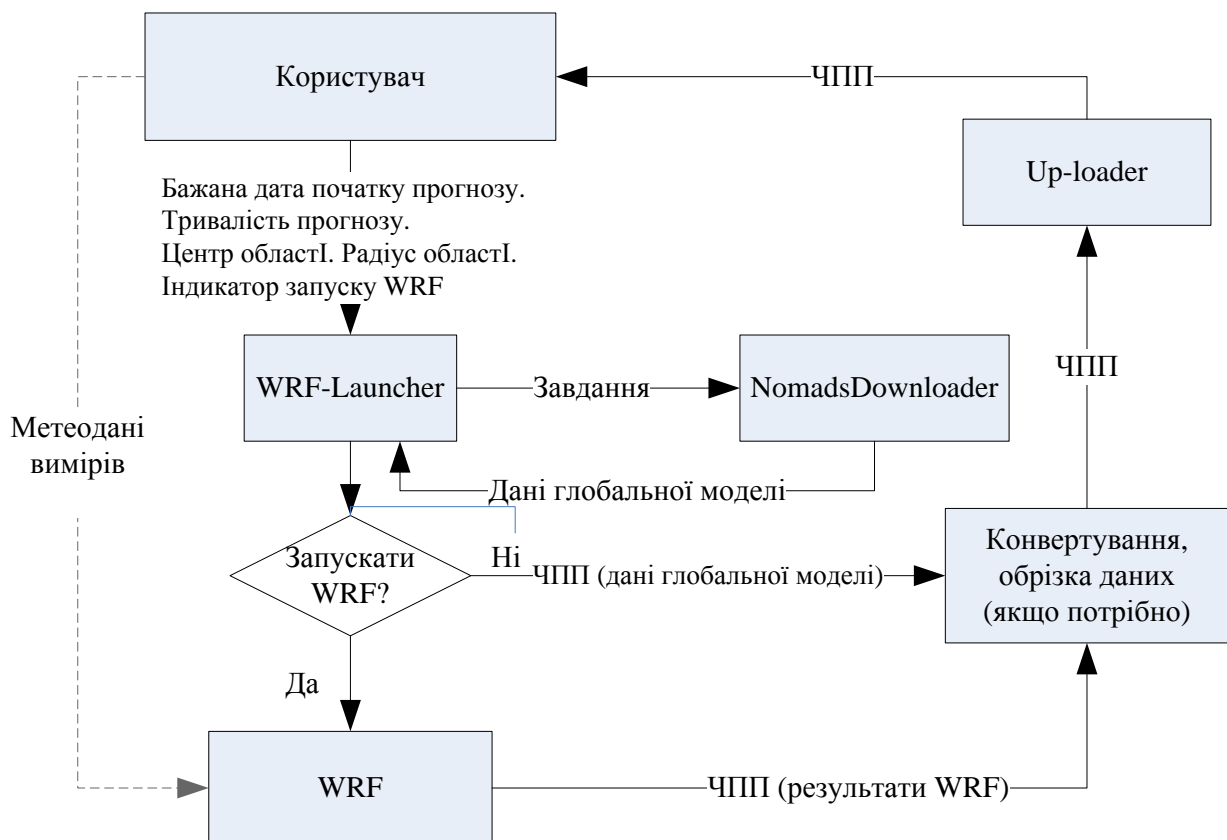


Рис. 1. Схема роботи автоматизованої системи прогнозу метеорологічних умов

Розглянемо роботу програми Wrf-launcher докладніше. На рис. 2 представлена схема роботи програми. Змінні, позначені на рис. 2.2, є параметрами програми WRF-launcher.

На початку роботи Wrf-launcher вибирає настроювання для вхідних файлів WRF з конфігураційного файла залежно від переданого йому радіуса області. Далі йде перевірка, чи відстоїть бажана дата початку розрахунку від поточного часу (змінна now на рис. 2) більш ніж на RAcOffset годин. У випадку позитивної відповіді із серверів NOMADS завантажуються доступні дані фінального метеорологічного аналізу, тобто тривимірні поля метеорологічних елементів, розраховані з урахуванням вимірів. Після того, як ці дані отримані, на їхній основі запускається модель WRF.

Якщо даних фінального аналізу досить, щоб покрити часовий інтервал, для якого необхідно провести розрахунки (ретроспективні розрахунки), то робота Wrf-launcher на цьому закінчується. Якщо ж для якогось моменту часу (наприклад, близького до дійсного часу запуску програми) відсутні файли фінального метеоаналізу, то для непокритого періоду часу будуть використовуватися файли метеопрогнозу. Wrf-launcher формує список можливих початкових часів метеопрогнозу (дані глобальних моделей метеопрогнозу, як правило, оновлюються у 0, 6, 12, 18 год. по Грінвичу). Кожному такому часу відповідає певний набір даних метеопрогнозу, що відстоять від початкового часу на 3, 6, 9..., 168 год. уперед та зберігаються на серверах NOMADS. У цей список потраплять тільки ті початкові часи, які відстоять від бажаного часу початку розрахунку не більше ніж на atoffset годин. Із цього списку вибирається найближча дата, для якої необхідно додатково завантажити найменше число файлів або ж просто найближча до бажаної дати початку розрахунку дата початку прогнозу (конкретний вибір регулюється параметром load_time_priority). Після того, як дані метеопрогнозів завантажені, на їхній основі запускається модель WRF з тими ж настроюваннями обчислювальної області, які використовувалися при запуску на основі даних фінального метеорологічного аналізу.

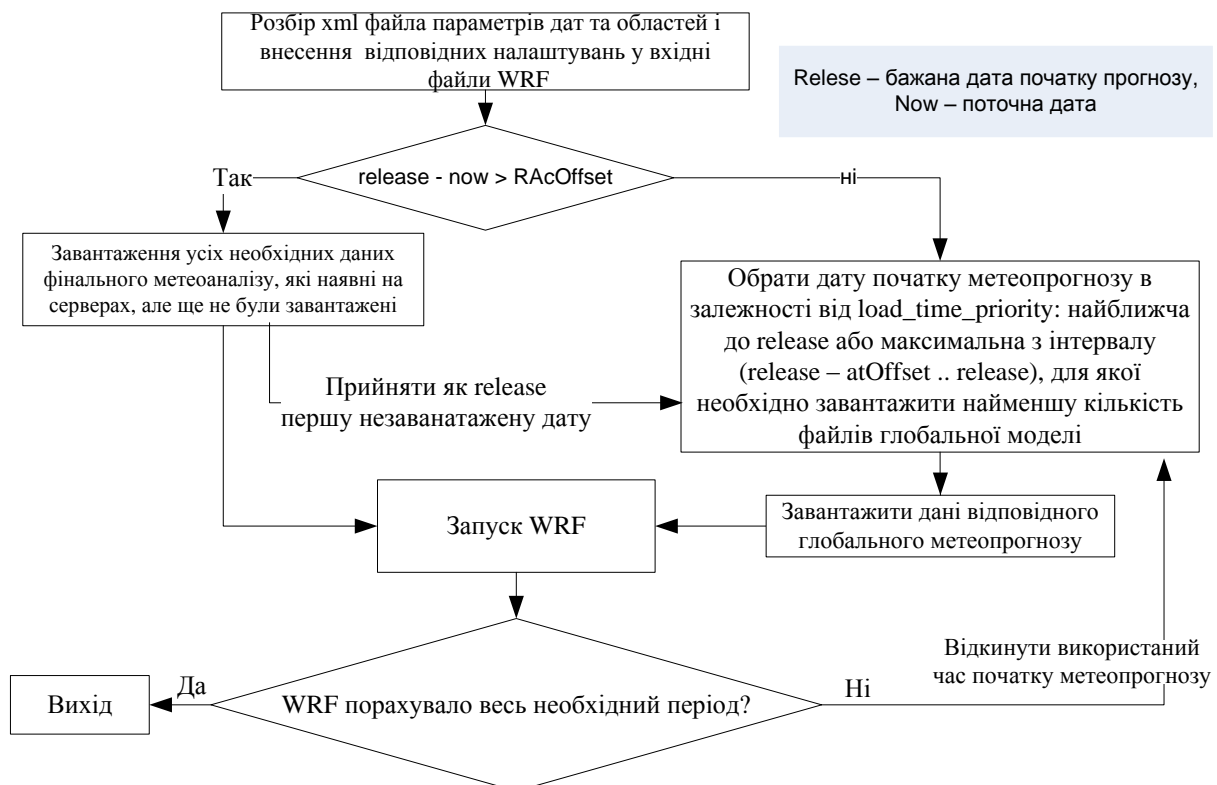


Рис. 2. Схема роботи програми Wrf-launcher

У випадку негативної відповіді на запитання, чи відстоїть бажана дата початку розрахунку від поточного часу більш ніж на RAcOffset годин, відразу формується список мож-

ливих початкових часів метеопрогнозів і завантажується набір даних за аналогічними правилами. Потім, на основі цих даних, запускається розрахунок моделі WRF.

Основною вимогою до автоматизованого розрахунку чисельного прогнозу погоди (ЧПП) поряд з точністю є швидкодія. Користувачеві системи надається на вибір 7 варіантів обчислювальних областей різних розмірів (від 16x16 до 640x640 км), для яких повинен проводитися прогноз на 96 год. менш ніж за годину. Користувач системи «WRF-Україна» може конфігурувати просторові дозволи, з якими система розраховує метеорологічні поля для кожної з областей. Параметри обчислювальних областей за замовчуванням представлені у табл. 1. У моделі WRF створюються вкладені області з поступовим зменшенням горизонтального просторового дозволу. Це дозволяє уникнути артефактів, викликаних інтеполяцією при переході з більш грубої сітки на більш дрібну. У запропонованих налаштуваннях WRF використовується коефіцієнт згущення, рівний 3. Усі області “квадратні”, тобто кількість вузлів і горизонтальний просторовий дозвіл у напрямках осей X і Y однакові. У табл. 1 наведені кількість вкладених областей для кожної з конфігурацій, кількість вузлів по горизонталі кожної з областей, горизонтальний дозвіл і крок інтегрування за часом у першій вкладеній області. Крок інтегрування в інших областях визначається автоматично діленням кроку інтегрування в батьківській області на коефіцієнт згущення. В останній колонці табл. 1 наведена швидкодія WRF для даної конфігурації в паралельному режимі розрахунків на 8-ядерному вузлі, 2,5 Ghz, 16 Гб оперативної пам'яті.

Точність розрахунків WRF залежить не тільки від дозволу сітки, але й від фізичних параметризацій. Було проведено тестування декількох конфігурацій фізичних параметризацій на прикладі розрахунків послідовності 24 год. прогнозів в області розміром 80x80 км навколо аеропорту м. Рівне. У результаті проведених досліджень для завдання за замовчуванням був обраний такий набір параметризацій мікрофізики хмар, процесів у діяльному шарі ґрунту й атмосферного прикордонного шару: `mp_physics=3`, `sf_surface_physics=2`, `bl_pbl_physics=2` (для наведених опцій див. посилання в [5]).

Результати порівняння розрахунків з даним набором параметризацій з вимірами метеостанції Рівненського аеропорту за грудень 2012 р. свідчать про дуже високу якість метеорологічного прогнозу: середньоквадратична помилка швидкості вітру дорівнює 1,4 м/с, а середньоквадратична помилка напрямку вітру: 26 град., що узгоджується з кращими показниками помилки інших моделей ЧПП, які використовуються для прогнозування поширення атмосферних забруднень [12]. (Більш детальний аналіз результатів розрахунків WRF у порівнянні з даними Рівненського аеропорту та Рівненської АЕС див. у роботі [3]).

Таблиця 1. Параметри обчислювальних областей WRF

Радіус області JRODOS, км	Число вкладених областей	Розміри сітки вкладених областей (Nx=Ny)	Розміри комірок вкладених областей (dx=dy), м	Часовий крок в області № 1, с	Час розрахунків прогнозу, хв.
100	3	45,25,49	45000,15000,5000	270	30
160	2	73,49	27000,9000,	135	28
320	2	67,73	30000,10000,	180	36

3. Функціональні вимоги, архітектура та реалізація системи «WRF-Web»

Система «WRF-Web» призначена для надання можливості отримання оперативного прогнозу погоди з використанням сучасних web-технологій та на основі представленої вище системи «WRF-Україна» для довільної території на детальних сітках. Користувач матиме можливість ввести через веб-інтерфейс такі параметри:

- географічні координати центру обчислювальної області (град.);
- радіус обчислювальної області (км);

- бажану дату початку розрахунку;
- тривалість розрахунку (год.).

Горизонтальний просторовий дозвіл сітки залежить від введеного радіуса (табл. 1). Крок сітки для даного радіуса є параметром і за необхідності може бути зміненим.

Проте, коли мова йде про одночасне on-line прогнозування на детальних сітках навіть для невеликої області для певної кількості користувачів, необхідно використовувати можливості хмарної інфраструктури, щоб розрахунки різних користувачів виконувались одночасно. Але реалізацію, тестування й попереднє налаштування системи значно зручніше здійснювати при роботі з виділеним обчислювальним сервером, на якому здійснюються розрахунки WRF. Тому у даній роботі використовувалась відповідна архітектура, представлена на рис. 3.

Систему розроблено з використанням вільного програмного забезпечення. Для розробки системи використано такі мови програмування: Java, PHP – для створення серверної компоненти; HTML, JavaScript – для розробки інтерфейсу кінцевих користувачів. Як СУБД обрано PostgreSQL з додатком PostGIS, що дозволяє зберігання просторових даних та виконання просторово-часових запитів до них.

Як картографічна основа використовується OpenStreetMap [14], що є відкритим проектом зі створення загальнодоступних карт світу. Для відображення на карті геометричних об'єктів, що створюються на основі розрахункових даних метеопрогнозу, використовуються JavaScript-бібліотека Leaflet та додаткові плагіни для реалізації необхідних функціональних можливостей системи.

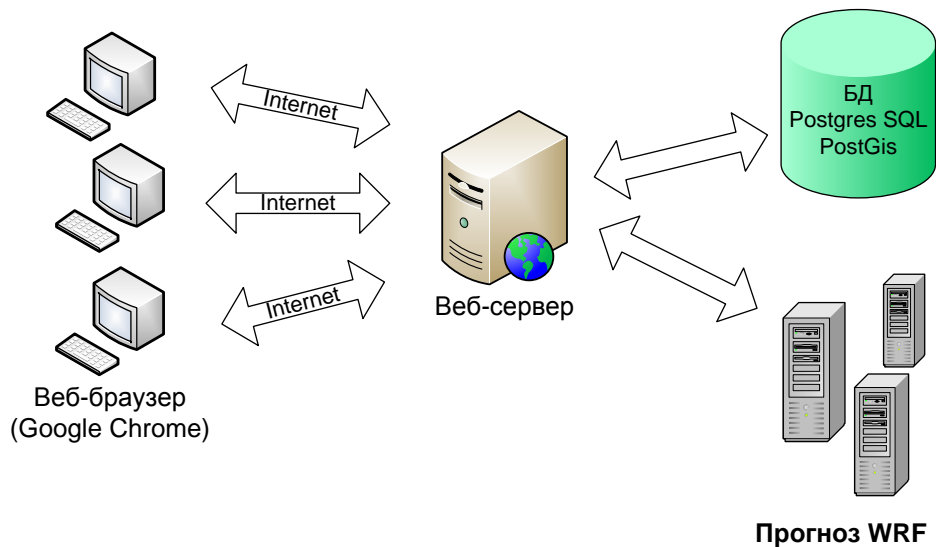


Рис. 3. Архітектура системи WRF-Web

Серверна компонента

При побудові системи як серверну платформу використано вільно розповсюджуваний сервер застосувань «Apache Tomcat» [15]. Серед сильних сторін середовища Apache Tomcat, актуальних при розробці системи «WRF-Web», можна відзначити забезпечення цілісної і повнофункціональної підтримки роботи на різних платформах (підтримка платформ Windows; Mac OS X; BSD; Linux; Solaris; VMS); використання інтернет-додатків, таких, як Java сервлети; реалізація специфікації сервлетів тощо.

Слід зазначити, що Apache Tomcat, починаючи з Tomcat 4.x, випускається з Catalina (контейнер сервлетів), Coyote (HTTP-коннектор) і Jasper (JSP-движок).

Catalina – контейнер сервлетів Tomcat'a, який реалізує специфікацію сервлетів Servlet API. Servlet API є основою для всіх інших технологій Java, що стосуються Web і

дають можливість динамічно генерувати будь-який web-контент, використовуючи будь-які бібліотеки, доступні для Java.

Cooyote – компонент стека HTTP Tomcat'a, який підтримує протокол HTTP 1.1 для веб-серверів або контейнера додатків. Cooyote прослуховує вхідні з'єднання на певному TCP порту сервера, пересилає запити в механізм Tomcat для обробки запитів і відправляє відповідь назад клієнту.

Jasper — механізм JSP Tomcat'a. Tomcat 5.x використовує Jasper 2, який є реалізацією специфікації JavaServer Pages 2.0 Sun Microsystems. Jasper аналізує JSP-файли для компіляції їх в Java код як сервлетів (які можуть бути оброблені за допомогою Catalina). Під час виконання Jasper може автоматично виявляти зміни JSP-файла і перекомпільовувати його.

Схема роботи описується такою послідовністю процесів.

- Клієнт (у нашому випадку Користувач, що подає заявку на формування прогнозу) відвідує веб-сторінку та надсилає HTTP-запит на сервер.

- Web-сервер отримує запит та передає його контейнеру сервлетів. Контейнер сервлетів може виконуватись у тому ж самому процесі, що і веб-сервер.

- Контейнер сервлетів з'ясовує, який сервлет слід викликати, виходячи з інформації про конфігурацію наявних сервлетів, та викликає його, передаючи як параметри об'єктні представлення запиту та відповіді.

- Сервлет використовує об'єкт запиту для отримання інформації про віддаленого користувача, параметри HTTP-запиту тощо. Сервлет виконує запрограмовані в ньому дії та надсилає результати роботи через об'єкт відповіді (JSONstring).

- Після того, як сервлет припиняє обробку запиту, контейнер сервлетів перевіряє коректність відправки відповіді й повертає управління до головного веб-сервера.

Також слід зазначити, що серверне середовище, зберігаючи в журналі БД «WRF-Web» інформацію стосовно сформованих користувачем прогнозів, дозволяє в разі потреби як переглядати результати прогнозування, так і формувати нові прогнози для подібних параметрів (координат та розміру області прогнозу).

З огляду на важливість збереження даних у журналі БД, використовується PHP Brige for Tomcat, тобто PHP на Tomcat. Серед інших причин вибору Java, а отже і Tomcat, стала наявність Java-бібліотеки для «читання» NetCDF-файлів з результатами метеопрогнозів, сформованих «WRF Україна».

Клієнтська частина

Система «WRF-Web» розроблена відповідно до класифікації [16] – фізично дволанкова та вертикально розподілена з тонким клієнтом. Схема Web-карти (Web map layout), що використовується в системі, – це схема, близька до fluid map layouts [17], однієї з двох найбільш популярних у Web-картографії, при якій карта займає всю сторінку, а всі інші елементи карти розміщуються на картографічну область і при вдалому проектуванні не закривають важливі просторові дані. Така схема має деякі переваги. У карти найбільш можливий масштаб для забезпечення великої візуальної деталізації і менша генералізація. Можливим недоліком є те, що при «поганому» проектуванні карта може виявитися складною і незбалансованою.

У системі «WRF-Web» застосовується картографічна анімація [18] типу «Карти динаміки площинних контурів явищ на різні дати». При створенні картографічної анімації в системі використовується анімація кольору і форми. Оскільки формування прогнозу виконується на розрахунковій сітці характерного розміру 80x80 комірок, на карту необхідно додавати значну кількість просторових об'єктів. Для забезпечення швидкодії даного процесу необхідне використання векторних тайлів.

Як зазначено в [19], векторні тайли досить ефективні. Mapbox опублікував специфікацію векторних тайлів (Vector Tile Specification) не так давно, і вони вже показали надзвичайну гнучкість. Розмір файла для векторних тайлів малий, що робить можливим базові карти з високою роздільною здатністю і ефективним кешуванням даних. Векторні тайли зберігають векторні дані в компактному форматі, що допускає гнучке застосування стилів для векторних об'єктів у браузері, на відміну від растрових тайлів.

4. Приклади використання системи «WRF-Web»

Наведемо приклад використання системи «WRF-Web» для формування метеопрогнозу. Параметрами для формування прогнозу є область розрахунку та дата, на яку необхідно сформувати прогноз. Користувач може задати необхідні параметри спочатку (режим «Ініціювати новий») або скористатись параметрами попередніх прогнозів (режим «З журналу») та внести необхідні зміни (рис. 4). У разі вибору режиму «З журналу» необхідно лише відкоригувати «Назву для ідентифікації розрахунку» та «Дату» і «Час». При виборі режиму «Ініціювати новий» для вибору області прогнозу необхідно вибрати радіус сітки та задати координати центру сітки у відповідних полях або вибором на карті за допомогою миші (рис. 4).

У пілотній версії системи можливі прогнози для чотирьох приземних змінних: температура повітря на висоті 2 м, тиск на рівні моря, напрям та швидкість вітру, сума конвективних і неконвективних опадів (рис. 5 і 6).

Розрахунок виконується на період 96 годин. Передбачається перегляд результатів на вибрану дату або у режимі слайд-шоу. Для аналізу зміни тенденції показників у часі передбачається можливість побудови графіка для вибраної комірки (рис. 7). Крім того, стандартними засобами браузера можна зберегти графік у файл формату pdf або роздрукувати на принтері. За необхідності, можна відобразити також розрахункову сітку (рис. 8).

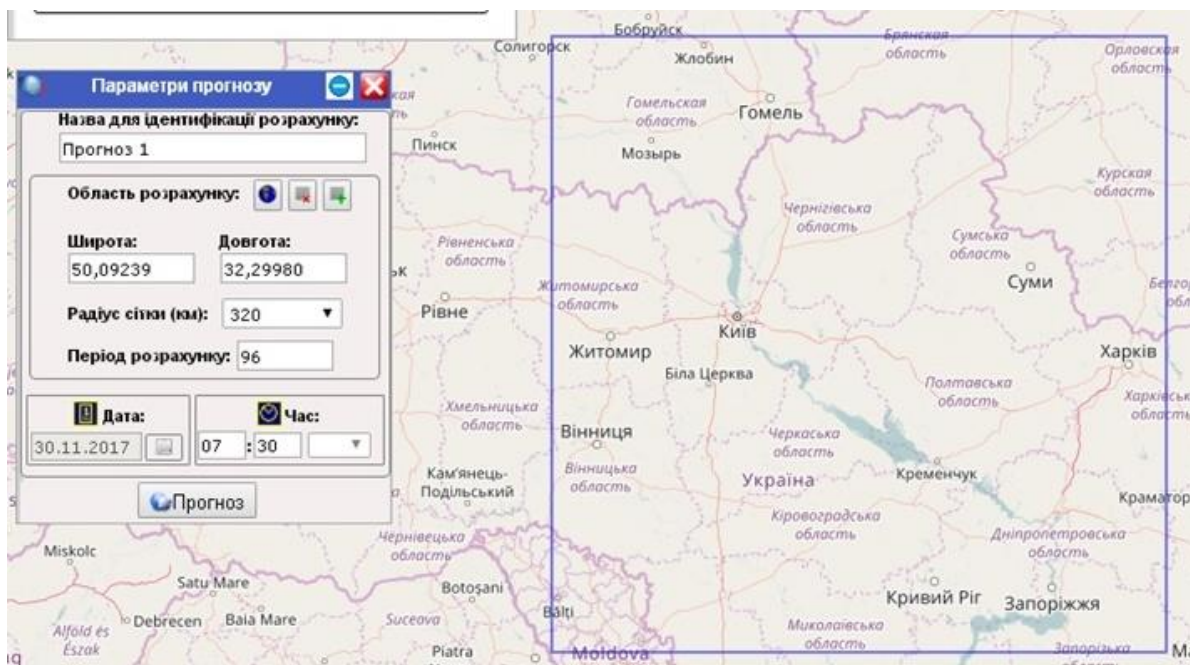


Рис. 4. Область прогнозу і зміна параметрів збереженого прогнозу

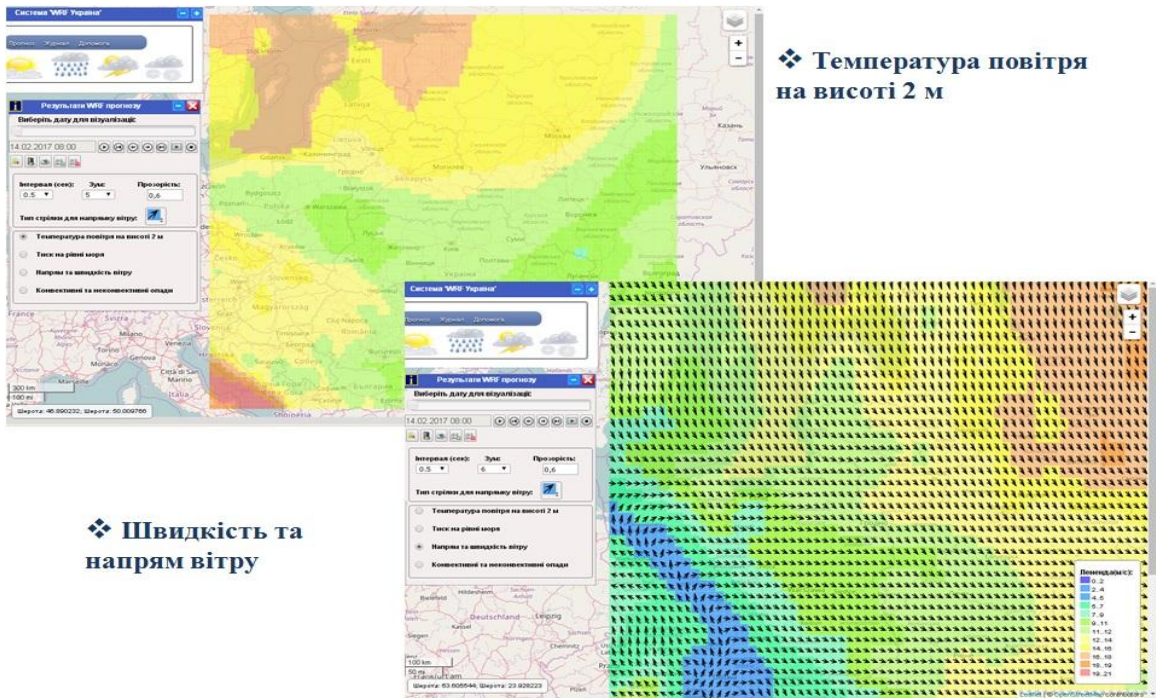


Рис. 5. Візуалізація результатів прогнозу: приземні температура, швидкість і напрям вітру

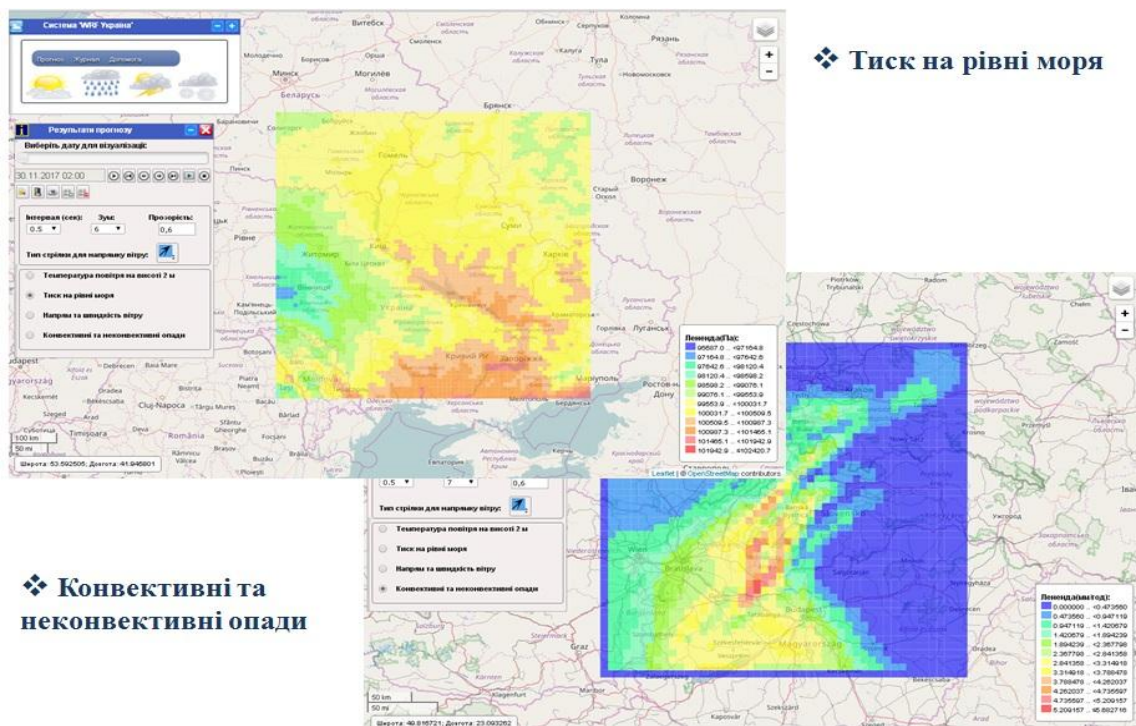


Рис. 6. Візуалізація результатів прогнозу: тиск на рівні моря, опади

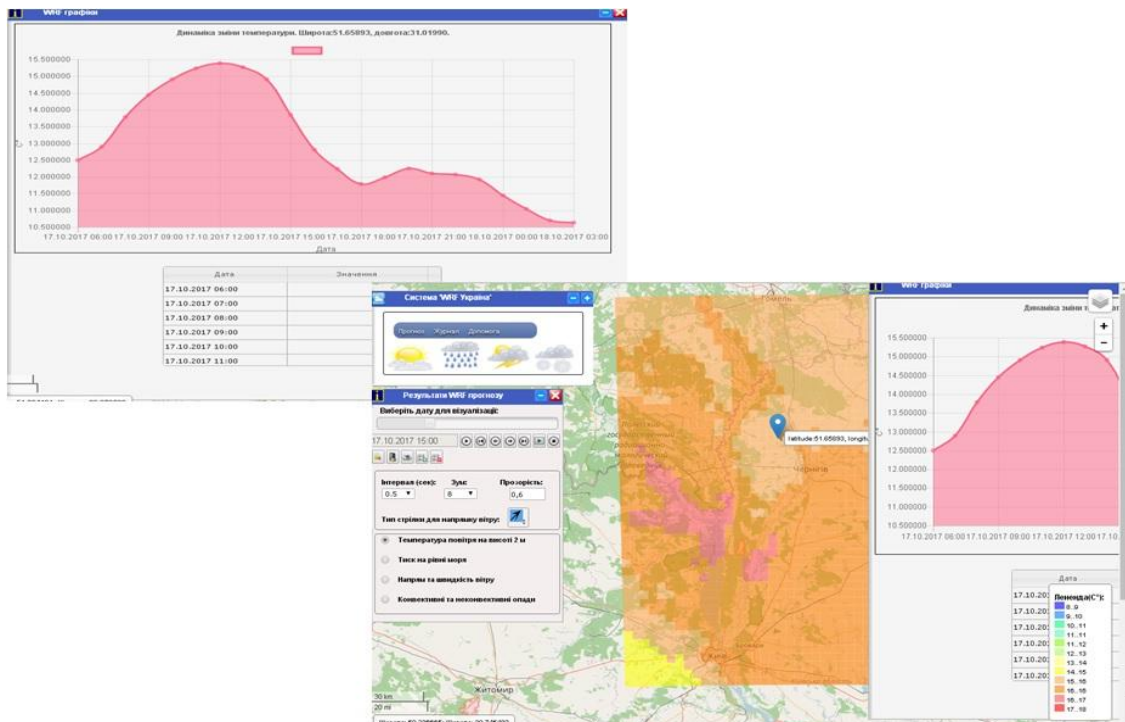


Рис. 7. Візуалізація результатів прогнозу: часові графіки

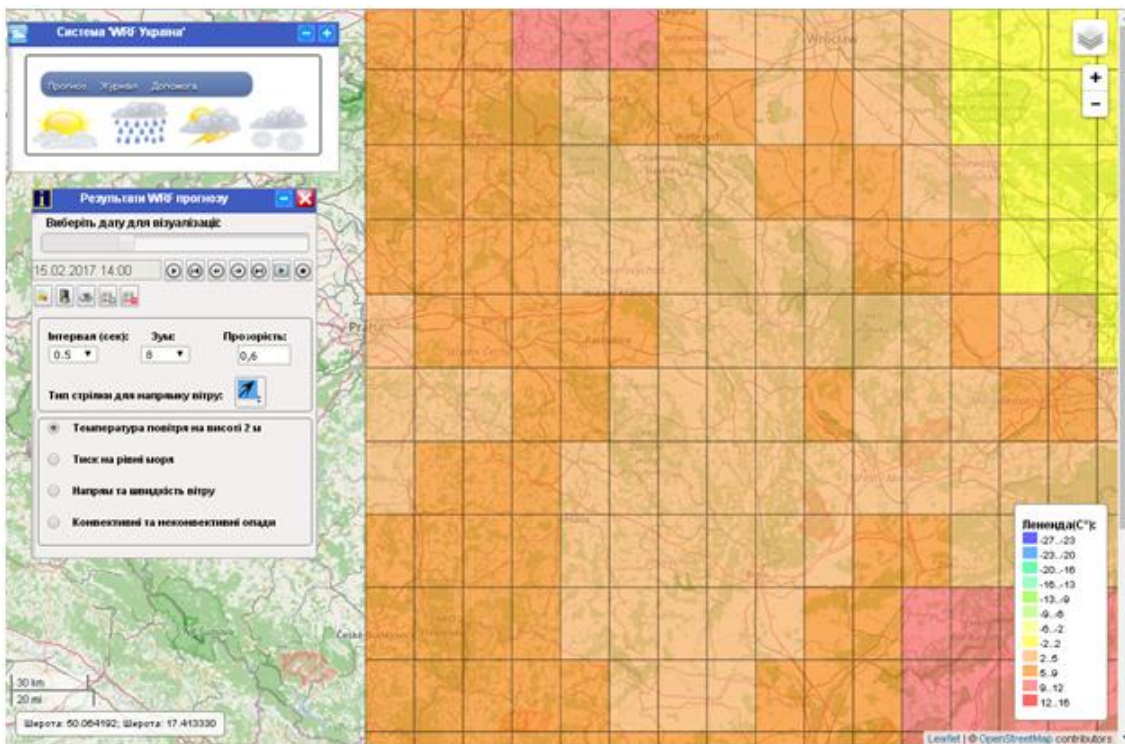


Рис. 8. Відображення розрахункової сітки

5. Висновки

У роботі розроблено інформаційну технологію, яка дозволяє прогнозувати метеорологічні умови по довільній території з високою роздільною здатністю на основі адаптації сучасних метеорологічних моделей та веб-технологій для завдання вхідних даних, отримання й візуалізації результатів. Для тестової експлуатації створено та встановлено пілотну версію веб-системи прогнозування погоди на детальних сітках навколо довільної точки Земної кулі на

замовлення користувача, в якій розрахунок прогнозу погоди здійснюється на виділеному сервері.

Для створення серверної компоненти обрано контейнер Tomcat, написаний на мові Java, що було обумовлено об'єктно-орієнтованою моделлю, розвинутими засобами створення додатків, мобільністю коду і, найголовніше, здатністю Java-програм виконуватися на будь-яких комп'ютерних платформах. Це забезпечило такі важливі властивості сучасних інформаційних систем, як розподіленість та мультиплатформність. Використання [Leaflet](#) та додаткових плагінів для формування векторних тайлів «на льоту» на основі даних запитів до БД дозволило створювати картографічну анімацію з прийнятною швидкістю демонстрації карт. Розробка системи з використанням вільного програмного забезпечення дозволяє відмовитись від значних затрат на закупівлю дорогого ПЗ.

Розроблена технологія може бути використана в Українському гідрометцентрі, Державній службі надзвичайних ситуацій, Міністерстві екології та інших відомствах, що потребують забезпечення детальними даними гідрометеорологічного аналізу і прогнозування. Розроблені сервіси, за умови відповідного удосконалення розробки та реалізації можливості автоматизованого запуску WRF у хмарній інфраструктурі, можуть бути надані також і для більш широкого кола дослідників навколишнього середовища для забезпечення даними гідрометеорологічних полів, деталізованими для умов конкретної місцевості у рамках реалізації Європейської хмарної ініціативи.

Подяки

Робота виконана за підтримки проекту комплексної цільової програми НАНУ «Грид-інфраструктура і грид-технології для наукових і науково-прикладних застосувань» та проекту Державного фонду фундаментальних досліджень №Ф76/34278.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Система численного прогноза погоды «WRF-Украина» / А.М. Гузий, И.В. Ковалец, А.А. Куцан [та ін.] // Математичні машини і системи. – 2008. – № 4. – С. 123 – 131.
2. Оперативне прогнозування метеорологічних полів для систем попередження про паводки у Карпатах / І.В. Ковалець, О.В. Халченков, С.М. Ануліч [та ін.] // Математичні машини і системи. – 2015. – № 3. – С. 118 – 125.
3. Халченков А.В. Адаптация метеорологической модели WRF для прогнозирования полей ветра вокруг Ривненской АЭС / А.В. Халченков, И.В. Ковалец, А.Н. Романенко // Математичні машини і системи. – 2015. – № 1. – С. 130 – 137.
4. Pielke R.A. Mesoscale meteorological modelling / Pielke R.A. – USA, San Diego: Academic Press, 2004. – 676 p.
5. Skamarock W.C. A description of the advanced research WRF version 3 [Електронний ресурс] / W.C. Skamarock, J.B.Klemp, J.Dudhia [et al.] // NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR. – USA, Boulder: National Center for Atmospheric Research, 2008. – 125 p. – Режим доступу: <http://wrf-model.org/>.
6. Автоматизация расчета прогностических метеорологических полей для использования в системе ядерного аварийного реагирования JRODOS / С.Н. Дидковская, Е.А. Евдин, А.В.Халченков [и др.] // Сб. трудов 9-й дистанционной науч.-практ. конф. «Системы поддержки принятия решений – теория и практика СППР 2013», (Киев, 1 июня 2013 г.). – Киев: ИПММС НАН Украины, 2013. – С. 69 – 72.
7. Application of decision support system JRODOS for assessments of atmospheric dispersion and deposition from Fukushima Daiichi nuclear power plant accident / I.A. Ievdin, A.V. Khalchenkov, I.V. Kovalets [et al.] // Int. J. of Energy for Clean Environment. – Vol. 13, N 1-4. – P. 179 – 190.
8. Kovalets I.V. Usage of the WRF-DHSVM model chain for simulation of extreme floods in mountainous areas: a pilot study for the Uzh River Basin in the Ukrainian Carpathians / I.V. Kovalets, S.L. Kivva, O.I. Udovenko // Natural Hazards. – Vol. 75, N 2. – P. 2049 – 2063.

9. New functionalities developed in the NERIS-TP project regarding meteorological data used by Decision Support Systems / S. Andronopoulos, I. Ievdin, I. Kovalets [et al.] // Radioprotection. – 2016. – HS1, 51. – P. S13 – S16.
10. Calculation of the far range atmospheric transport of radionuclides after the Fukushima accident with the atmospheric dispersion model MATCH of the JRODOS system / I.V. Kovalets, L. Robertson, C. Persson [et al.] // Int. J. of Environment and Pollution. – 2014. – Vol. 54, N 2/3/4. – P. 101 – 109.
11. Rutledge G. NOMADS – a climate and weather model archive at the National Oceanic and Atmospheric Administration / G. Rutledge, J. Apert, W. Ebusizaki // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2006. – Vol. 87. – P. 327 – 341.
12. Astrup P. Comparison of NWP prognosis and local monitoring data from NPPs / P. Astrup, T. Mikkelsen // Radioprotection. – 2010. – Vol. 45. – P. S97 – S111.
13. Ковалец И.В. Использование параллельных вычислений в метеорологической модели WRF / И.В. Ковалец, А.М. Гузий // Математичні машини і системи. – 2011. – № 1. – С. 90 – 95.
14. OpenStreetMap [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://uk.wikipedia.org/wiki/OpenStreetMap>.
15. Apache Tomcat [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tomcat.apache.org>.
16. Таненбаум Э. Распределенные системы. Принципы и парадигмы / Э. Таненбаум, М. ван Стеен. – СПб.: Питер, 2003. – 877 с.
17. Muehlenhaus I. Web Cartography Map Design for Interactive and Mobile Devices / I. Muehlenhaus. – CRC Press, 2014. – 254 с.
18. Геоинформатика: учебник для студ. вузов / Е.Г. Капралов, А.В. Кошкарев, В.С. Тикунов [и др.]; под ред. В.С. Тикунова. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 480 с.
19. Rubalcava R. Introducing ArcGIS API 4 for JavaScript Turn Awesome Maps into Awesome Apps / Rubalcava R. – New York: Apress, 2017. – 136 с.

Стаття надійшла до редакції 02.01.2018