

АРХІТЕКТУРА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КОСМІЧНОЇ ПОГОДИ

Данило Івантишин¹, Євген Буров², Василь Литвин³

Національний університет “Львівська політехніка”,

¹ danylo.ivantyshyn@gmail.com, ORCID 0000-0002-1530-3026

² yevhen.v.burov@lpnu.ua, ORCID 0000-0001-8653-1520

³ vasy117.lytvyn@gmail.com, ORCID -0000-0002-9676-0180

© Івантишин Д.-Н., Буров Є., Литвин В., 2021

Проаналізовано предметну область та визначено основні функції інтелектуальної системи дослідження параметрів космічної погоди. Розроблено модель статичної структури інтелектуальної системи, а також змодельовано її динамічні аспекти, побудовано архітектуру інтелектуальної системи дослідження параметрів космічної погоди на основі дворівневої моделі “клієнт–сервер”. Наукова новизна отриманих результатів полягає у розробленні моделі інтелектуальної системи дослідження параметрів космічної погоди. Практичне значення інтелектуальної системи полягає в її можливостях: автоматизованому збиранні та опрацюванні даних про прояви сонячної активності; внесенні інформації у базу даних; аналізі даних і встановленні зв'язків між показниками геліо- та геоактивності, а також прогнозуванні геофізичних збурень, спричинених космічними факторами.

Ключові слова: інтелектуальна система; інформаційна модель; архітектура; сонячна активність; сонячно-земні зв'язки.

Вступ

Термін “космічна погода” стосується умов у космічному просторі, зокрема на Сонці, в міжпланетному середовищі та в магнітосферно-іоносферній системі Землі, які можуть впливати на продуктивність та надійність космічних і наземних технологічних систем, а також на самопочуття та здоров'я людей [1, 2].

Сонячна активність і пов'язані з нею процеси в ближньому космосі проявляються у вигляді певних циклічних змін, на які накладаються потужні й важкопередбачувані спорадичні збурення.

Незважаючи на відносну постійність випромінювання Сонця у видимому світлі, в його впливі на Землю наявна змінна складова, що спричиняє значні зміни геофізичних умов як в навколоземному космічному просторі, так і на самій Землі. Під час сплесків активності в короні Сонця зароджуються інтенсивні потоки рентгенівського випромінювання і енергетичних заряджених частинок – сонячних космічних променів, а також відбуваються викиди величезних мас плазми і магнітного поля в міжпланетний простір [3].

Дослідження впливу сонячної активності на навколоземний простір сьогодні є актуальною проблемою, оскільки в системі Сонце – Земля трапляються екстремальні явища, коли спалахи і

викиди маси, що відбулися на Сонці, дуже істотно впливають на навколоземний космічний простір, (наприклад, Квебецька подія 13–14 березня 1989 р., події жовтня–листопада 2003 р.). Ці події продемонстрували вразливість людства до проявів космічної погоди та необхідність детальнішого її вивчення і урахування факторів, що впливають на людину, під час експлуатації та проектування технічних систем на Землі та в космосі. І хоча в загальних рисах картина сонячно-земних зв'язків видається якісно зрозумілою, далеко не всі ланки ланцюжка цих зв'язків однаково вивчені [3, 4].

Постановка проблеми

Про важливість проблеми космічної погоди для економіки й обороноздатності США свідчить той факт, що періодично Федеральний уряд США затверджує Національну стратегію та план дій у галузі космічної погоди, в яких визначає короткотермінові (від шести місяців до двох років), середньострокові (від двох до п'яти років), довгострокові (від п'яти до десяти років) і постійні стратегічні цілі й завдання для вирішення комплексу питань у галузі космічної погоди, до яких залучені різні відомства та спеціальні підрозділи Міністерства оборони США [5]. Стратегічний план, прийнятий Федеральним урядом США у 2019 р., спрямований на досягнення трьох цілей, кожна із яких визначає комплекс завдань для підвищення готовності до космічних погодних подій:

1. Посилення захисту національної безпеки та комерційних активів від впливу космічної погоди.
2. Поширення точних та своєчасних характеристик і прогнозу стану космічної погоди.
3. Складання планів реагування на події космічної погоди та подолання їх наслідків.

Важливого значення питанням космічної погоди надає також Європейський Союз, зокрема Європейське космічне агентство [6, 7]. Серед заходів, які здійснюють європейські дослідницькі групи задля вдосконалення моделей прогнозування космічної погоди, відзначимо:

- створення автоматичних інструментів для прогнозування сонячної активності;
- прогнозування подій стосовно сонячних енергетичних частинок;
- прогнозування та попередження щодо геомагнітних збурень;
- моделювання та прогнозування параметрів іоносфери.

Дослідження Сонця і сонячно-земних зв'язків ведуть численні наземні та космічні засоби спостережень. У результаті дані про індекси сонячної активності, індекси геофізичних збурень, інформація про галактичні космічні промені зберігаються в різних форматах та на різних серверах і це ускладнює роботу з такими даними. Інтелектуальна система дослідження параметрів космічної погоди націлена на автоматизоване завантаження даних про стан космічної погоди, форматування цих даних, опрацювання масиву даних і отримання необхідної інформації про стан космічної погоди, а також виявлення нових зв'язків між показниками геліо- й геоактивності та прогнозування геофізичних збурень, спричинених космічними факторами. Отже, створення та впровадження інтелектуальної системи актуальні та мають практичне значення.

Аналіз останніх досліджень

Комплекс “Сонце – сонячний вітер – магнітосфера Землі” – складна нелінійна динамічна система, в якій відбуваються процеси з різними просторовими і часовими масштабами, які взаємодіють. Ця система фактично перебуває у нерівноважному стані. Крім того, повна інформація про її стан недоступна.

Сонячна активність, особливо викиди корональних мас, сонячні спалахи та енергетичні частинки – основні фактори, що контролюють космічну погоду. На космічну погоду істотно впливають швидкість і густина сонячного вітру та міжпланетне магнітне поле, що переноситься плазмою сонячного вітру. З космічною погодою пов'язані різноманітні фізичні явища, зокрема геомагнітні бурі, збурення атмосферних електричного поля та інфразвуку. Ця проблема

потребує спостереження, моніторингу, аналізу та моделювання, спрямованих на розуміння та прогнозування стану Сонця, міжпланетного та навколоземного середовища, а також впливів на них сонячних та несонячних збурень, прогнозування потенціалу впливу на біологічні та технологічні системи [3, 4, 8, 9].

У контексті поточної дорожньої карти Італійського космічного агентства оцінюється можливість розвитку національного наукового центру обробки даних космічної погоди, зокрема визначено три основні напрями майбутніх досліджень: теоретичні дослідження, покладені в основу вивчення космічної погоди; моделювання на підставі наукових даних; прогнозування та аналіз впливів космічної погоди [9].

Сучасний стан і перспективи використання машинного навчання для завдань прогнозування космічної погоди висвітлено в [10]. Запропоновано перенести парадигму прогнозування космічної погоди на імовірнісний підхід, зосереджений на надійній оцінці невизначеності із використанням машинного навчання, оскільки сьогодні у вільному доступі є дані спостережень космічних місії упродовж кількох десятиліть.

Для прикладу, Advanced Composition Explorer (ACE), GGS WIND і Deep Space Climate Observatory (DSOVR) надають дані про плазму in-situ поблизу першої точки Лагранжа (L1), Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) та Solar Dynamics Observatory (SDO) надають зображення Сонця на різних довжинах хвиль і дані магнітного поля, а також сонячної корони. Супутник GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) надає дані вимірювань геомагнітного поля, потоків частинок і рентгенівського випромінювання на геостаціонарній орбіті Землі. База даних OMNI надає як годинні, так і щохвилинні дані про магнітне поле сонячного вітру та дані щодо плазми, енергетичні потоки протонів, геомагнітні та сонячні індекси активності. На додаток до космічних вимірювань, мережа наземних магнітометрів забезпечує вимірювання магнітного поля Землі.

Прагнучи спрогнозувати планетарний Kp -індекс за межами поточних одно- та чотиригодинних прогнозів, науковці запропонували рекурентну нейронну мережу, яка навчається на основі даних трьох десятиліть віртуальної обсерваторії NASA OMNI і прогнозує індекс Kp до 24 год. Використовуючи набір інструментів нейронної мережі Matlab, багат шарова модель перцептрона навчається на вхідних даних, що складаються із Kp для заданого інтервалу, а також з різних наборів параметрів сонячного вітру [11].

Прогрес та перспективи досліджень геомагнітних збурень, спричинених ефектами сонячних спалахів, проаналізовано в [12]. Збільшення обсягу даних, підвищення їх точності, надійності, часової роздільної здатності надалі сприятиме удосконаленню моделей, а відтак прогресу в розумінні явищ, зумовлених сонячною активністю.

Результати дослідження впливу космічних факторів на природний атмосферний інфразвук наведено в [13]. Зокрема, показано, що в дослідженнях космічної погоди необхідно враховувати, крім геомагнітного поля, інші геофізичні поля.

Формулювання цілі статті

Мета статті – аналіз та визначення основних функцій інтелектуальної системи дослідження параметрів космічної погоди, а також побудова архітектури цієї системи.

Виклад основного матеріалу

Діаграма варіантів використання є найзагальнішою концептуальною моделлю складної системи, вихідною для побудови всіх інших діаграм.

Діаграма варіантів використання інтелектуальної системи дослідження параметрів космічної погоди відображає функціональність системи за допомогою акторів та варіантів використання (рис. 1).

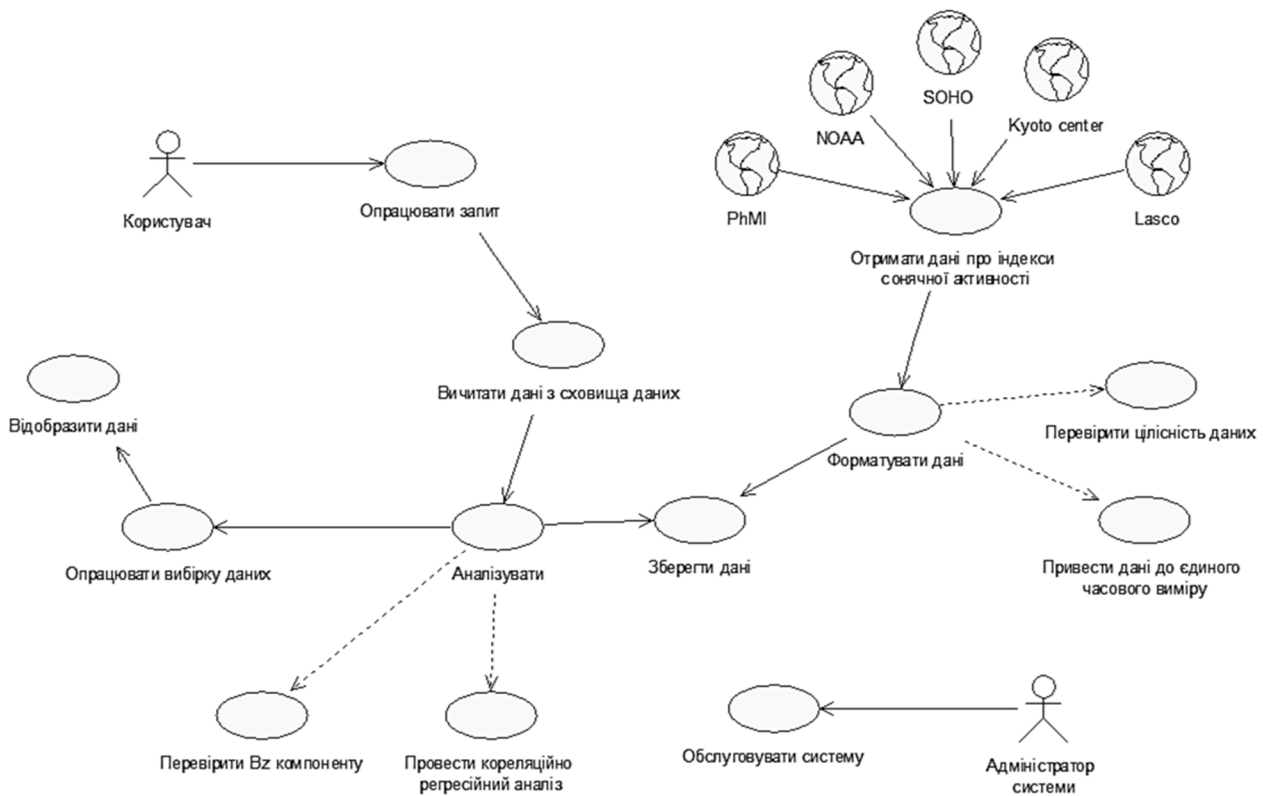


Рис. 1. Діаграма варіантів використання Інтелектуальної системи дослідження параметрів космічної погоди

Як видно з діаграми, у системі наявні два актори:

– користувач, який надсилає запит на отримання даних, а Інтелектуальна система дослідження параметрів космічної погоди відповідно приймає запит і здійснює вибірку за необхідними полями зі сховища даних. Коли система оперує даними, які запитував користувач, то відображає інформацію користувачеві;

– розробник, завдання якого – обслуговування Інтелектуальної системи дослідження параметрів космічної погоди.

Одним із прецедентів інтелектуальної системи є отримання даних про індекси сонячної активності, їх подальше форматування та збереження у сховищі даних. Ці дані завантажуються з інтернет-ресурсів, таких як NOAA, SOHO, ФМІ НАНУ тощо. Як зображено на діаграмі (рис. 1), варіант використання “Форматувати дані” використовує відношення “розширення” до елементів “перевірити цілісність даних” та “привести дані до єдиного часового проміжку”.

Іншим прецедентом Інтелектуальної системи є аналіз інформаційних даних, зокрема кореляційно-регресійний аналіз для пошуку можливих, ще не відомих зв’язків між показниками геліо- та геоактивності.

Моделювання статичної структури інтелектуальної системи здійснено з використанням діаграми класів, яка відображає зв’язки між класами, об’єктами, атрибутами та операціями.

Класи є абстракцією сутностей із загальними характеристиками. Асоціації відображають відносини між класами.

Як видно з рис. 2, Інтелектуальна система дослідження параметрів космічної погоди складається із таких класів:

- Сховище даних.

- Індeksi сонячної активності:
 - сонячний вітер;
 - індeksi числа Вольфа;
 - радіовипромінювання;
 - міжпланетне магнітне поле;
 - викиди корональних мас;
 - потік протонів.
- Галактичні космічні промені.
- Індeksi геофізичних збурень:
 - магнітне поле;
 - інфразвукове поле;
 - авроральний електроджет.
- Аналізатор.

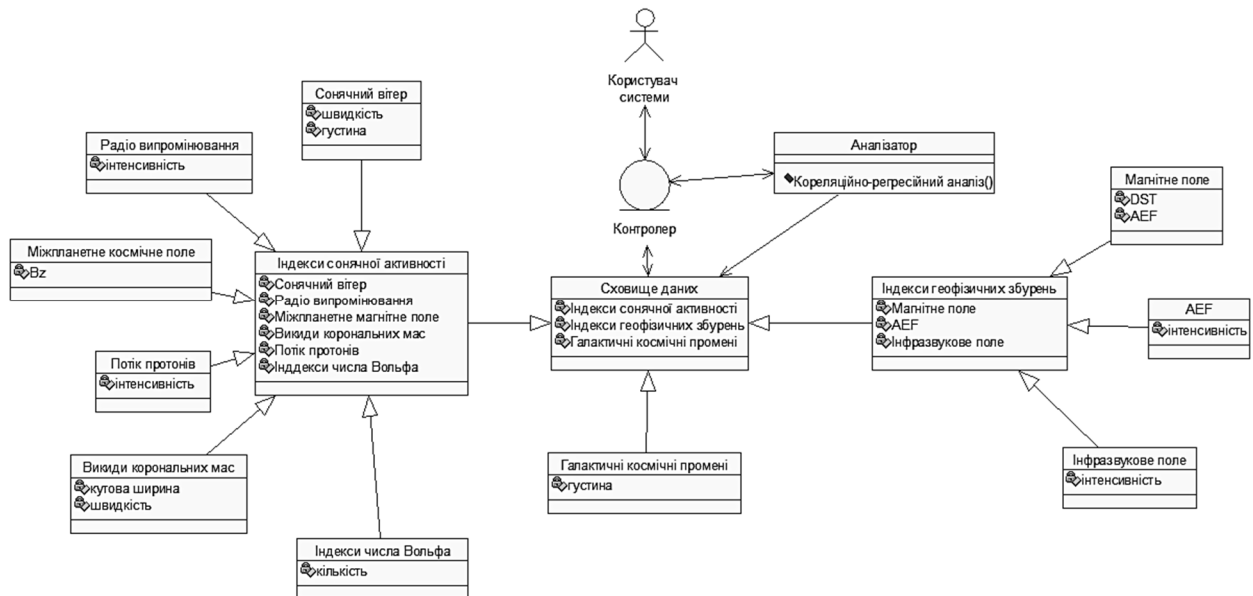


Рис. 2. Діаграма класів
Інтелектуальної системи дослідження параметрів космічної погоди

Користувач системи, який бажає отримати ту чи іншу інформацію про геліо- та геофізичну активність, звертається до сутності “Інтелектуальна система дослідження параметрів космічної погоди”.

Інтелектуальна система взаємодіє із класом *Сховище даних*. *Сховище даних* — це база даних, у якій зберігаються дані про геліо- та геофізичну активність: індeksi сонячної активності, індeksi геофізичних збурень, густину потоку галактичних космічних променів.

Клас *Аналізатор* – інтелектуальна складова системи дослідження параметрів космічної погоди. Клас *Аналізатор*, взаємодіючи зі *Сховищем даних*, дає змогу, зокрема, виконувати кореляційно-регресійний аналіз даних із метою встановлення можливих, ще не відомих зв’язків між показниками геліо- та геоактивності та прогнозування показників геоактивності у майбутньому.

Динамічні аспекти функціонування Інтелектуальної системи дослідження параметрів космічної погоди змодельовано за допомогою діаграми послідовності, яка описує взаємодію між класами з погляду обміну повідомленнями у часі.

Як видно з діаграми на рис. 3, першою на часовому проміжку в автоматизованому режимі працює Система оновлення даних, яка періодично надсилає запити до зовнішніх джерел даних, таких як PMI, NOAA, SOHO тощо, щоб отримати інформацію щодо наявності нових даних про стан космічної погоди. Якщо такі дані наявні, надсилається запит на їх отримання. Після перевірки та форматування отриманих даних вони зберігаються у Сховищі даних.

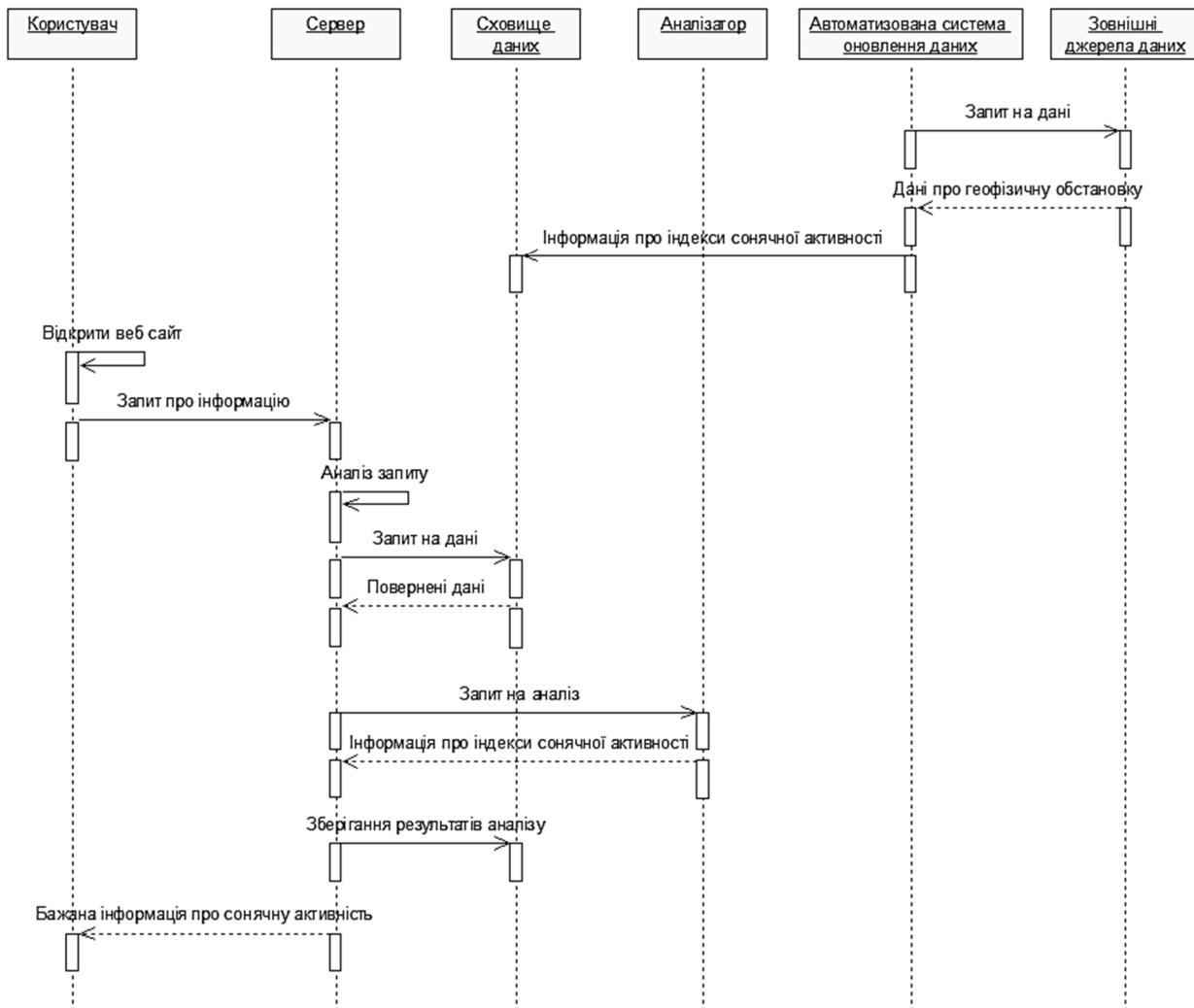


Рис. 3. Діаграма послідовності
Інтелектуальної системи дослідження параметрів космічної погоди

Користувач для отримання необхідної інформації про стан космічної погоди взаємодіє з Інтелектуальною системою дослідження параметрів космічної погоди через сервер системи. Для цього Користувач відкриває вебсторінку і здійснює запит на необхідну інформацію. Надсилається відповідний REST запит до Сервера, який обробляє запит і формує запит до Сховища даних. Сховище даних відправляє вибірку даних до Сервера, який передає дані в обгортку JSON об'єкта і пересилає до Користувача. В результаті цього Користувач Інтелектуальної системи дослідження параметрів космічної погоди отримує необхідну інформацію про параметри геліо- та геофізичної активності.

Для проведення наукових досліджень з метою виявлення нових геліогеофізичних зв'язків та прогнозування стану космічної погоди Користувач через Сервер системи взаємодіє з Аналізатором, який на основі аналізу масиву даних дозволяє отримання необхідної інформації.

Виконаний функціональний аналіз інтелектуальної системи дослідження параметрів космічної погоди дав змогу побудувати архітектуру розроблюваної системи на основі дворівневої моделі “клієнт–сервер” (рис. 4).

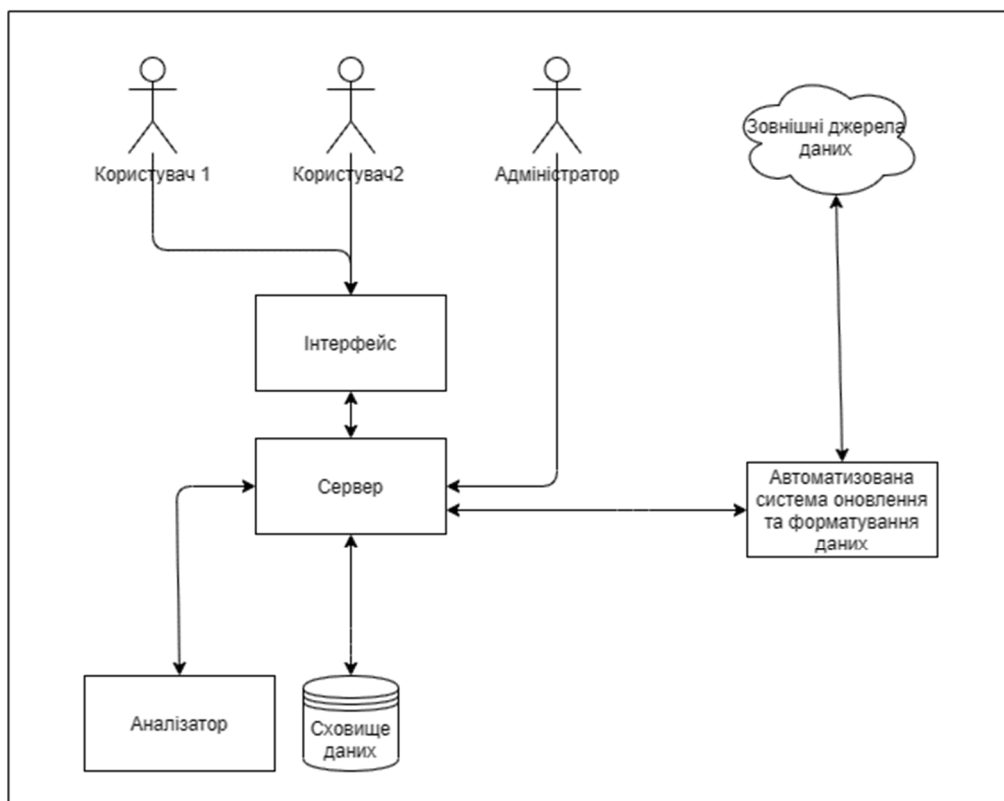


Рис. 4. Архітектура Інтелектуальної системи дослідження параметрів космічної погоди

Клієнт-серверна інтелектуальна система складається із трьох основних компонент: програмне забезпечення сервера; програмне забезпечення кінцевого користувача; прикладне програмне забезпечення.

За допомогою цього програмного забезпечення користувачі встановлюють зв'язок із сервером, формують запити, які автоматично генеруються у запити СКБД і відправляються на сервер. Сервер відповідає за зберігання, модифікацію, вибірку й видалення даних, пов'язаних із розв'язуванням прикладного завдання, приймає і опрацьовує запити, а потім передає отримані результати клієнтам. Прикладний компонент інтелектуальної системи – це набір правил і алгоритмів реалізації функцій системи, реакцій на дії користувачів або внутрішніх подій і опрацювання даних.

Висновки

Дослідження космічної погоди стосуються фізичних процесів у космосі, починаючи від сонячних явищ до їх впливу на навколосезонний простір та на поверхню Землі. Фізичне розуміння залученого ланцюга процесів ґрунтується на поєднанні спостереження, аналізу даних та інтерпретації, теоретичного та емпіричного моделювання, тому розроблення інтелектуальної системи для дослідження стану космічної погоди є актуальною проблемою і має практичне значення.

Виконано аналіз предметної області та визначено основні функції інтелектуальної системи дослідження параметрів космічної погоди, що дало змогу побудувати архітектуру інтелектуальної системи на основі дворівневої моделі “клієнт–сервер”.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у розробленні моделі інтелектуальної системи дослідження параметрів космічної погоди.

Практичне значення інтелектуальної системи дослідження параметрів космічної погоди полягає в її можливостях: автоматизованому збиранні та опрацюванні даних про прояви сонячної активності; внесенні інформації у базу даних; аналізі даних і встановленні зв'язків між показниками геліо- та геоактивності, а також прогнозуванні геофізичних збурень, спричинених космічними факторами.

Список літератури

1. Rainer Schwenn (2006). Space Weather: The Solar Perspective. *Living Rev. Solar Phys.*, Vol. 3, 2. URL: <https://doi.org/10.12942/lrsp-2006-2>.
2. Guhathakurta M. (2021). Everyday space weather. *Journal Space Weather Space Clim.*, Vol. 11, 36. URL: <https://doi.org/10.1051/swsc/2021019>.
3. Кузнецов В. Д. (2012). Солнечные источники космической погоды. *Влияние космической погоды на человека в космосе и на Земле: труды Междунар. конфер.*, 4–8 июня 2012. С. 11–28. URL: https://www.researchgate.net/publication/309638193_Solar_Sources_of_Space_Weather_Solnecnye_istocniki_kosmiceskoj_pogody_in_russian.
4. Ермолаев Ю. И., Ермолаев М. Ю. (2009). Солнечные и межпланетные источники геомагнитных бурь: аспекты космической погоды. *Геофизические процессы и биосфера*, Т. 8, № 1. С. 5–35. URL: http://press.cosmos.ru/sites/default/files/library/yermolaev_p.pdf.
5. URL: <https://aerospace.org/sites/default/files/2019-03/Natl%20Space%20Weather%20Strategy%20Mar19.pdf>.
6. Opgenoorth H. J., Wimmer-Schweingruber R. F., Belehaki A. et al. (2019). Assessment and recommendations for a consolidated European approach to space weather – as part of a global space weather effort. *Journal Space Weather Space Clim.*, Vol. 9, A37. URL: <https://doi.org/10.1051/swsc/2019033>
7. Belehaki A., Messerotti M., Candidi M. (2014). Developing Space Weather products and services in Europe – Preface to the Special Issue on COST Action ES0803. *J. Space Weather Space Clim.*, Vol. 4, E1. URL: <https://doi.org/10.1051/swsc/2014032>.
8. Гайдаш С. П., Белов А. В., Абуни А. А., Абунина М. А. (2016). Центр прогнозов космической погоды (ИЗМИРАН). *Практические аспекты гелиогеофизики: материалы спец. секции “Практические аспекты науки космической погоды”*. Москва. С. 22–31. URL: <http://www.iki.rssi.ru/books/2016gelioph.pdf>.
9. Plainaki C., Antonucci M., Bemporad A. et al. (2020). Current state and perspectives of Space Weather science in Italy. *Journal Space Weather Space Clim.*, Vol. 10, 6. URL: <https://doi.org/10.1051/swsc/2020003>.
10. Camporeale E. (2019). The Challenge of Machine Learning in Space Weather: Nowcasting and Forecasting. *Space Weather*, Vol. 17, Issue 8, 1166–1207. URL: <https://doi.org/10.1029/2018SW002061>.
11. Sexton E. S. (2019). Kp forecasting with a recurrent neural network /Ernest Scott Sexton, Katariina Nykyri and Xuanye Ma. *Journal Space Weather Space Clim.*, Vol. 9, A19. URL: <https://doi.org/10.1051/swsc/2019020>.
12. Curto J. J. (2020). Geomagnetic solar flare effects: a review. *Journal Space Weather Space Clim.*, Vol. 10, 27. URL: <https://doi.org/10.1051/swsc/2020027>.
13. Koshovyy V., Ivantyshyn O., Mezentsev V., Rusyn B., Kalinichenko M. (2020). Influence of active cosmic factors on the dynamics of natural infrasound in the Earth's atmosphere. *Romanian Journal of Physics*, Vol. 65, 813. URL: https://rjp.nipne.ro/2020_65_9-10/RomJPhys.65.813.pdf.

References

1. Rainer Schwenn (2006). Space Weather: The Solar Perspective. *Living Rev. Solar Phys.*, Vol. 3, 2. URL: <https://doi.org/10.12942/lrsp-2006-2>.
2. Guhathakurta M. (2021). Everyday space weather. *Journal Space Weather Space Clim.*, Vol. 11, 36. URL: <https://doi.org/10.1051/swsc/2021019>.
3. Kuznetsov V. D. (2012). Solar sources of space weather / International conference Space weather effects on humans in space and on Earth. *Space Weather Effects on Humans: in Space and on Earth. Proceedings of the International Conference*, 4–8 June, 2012, 11–28. (in Russian). URL: https://www.researchgate.net/publication/309638193_Solar_Sources_of_Space_Weather_Solnecnye_istocniki_kosmiceskoj_pogody_in_russian.
4. Yermolaev Yu. I., Ermolaev N. Yu. (2009). Solar and interplanetary sources of geomagnetic storms: space weather aspects. *Geophysical processes and biosphere*, Vol. 8, No. 1, 5–35 (in Russian). URL: http://press.cosmos.ru/sites/default/files/library/yermolaev_p.pdf.

5. URL: <https://aerospace.org/sites/default/files/2019-03/Natl%20Space%20Weather%20Strategy%20Mar19.pdf>.
6. Opgenoorth H. J., Wimmer-Schweingruber R. F., Belehaki A. at all. (2019). Assessment and recommendations for a consolidated European approach to space weather – as part of a global space weather effort. *J. Space Weather Space Clim.*, Vol. 9, A37. URL: <https://doi.org/10.1051/swsc/2019033>
7. Belehaki A., Messerotti M., Candidi M. (2014). Developing Space Weather products and services in Europe – Preface to the Special Issue on COST Action ES0803. *Journal Space Weather Space Clim.*, Vol. 4, E1. URL: <https://doi.org/10.1051/swsc/2014032>.
8. Gaidash S. P., Belov A. V., Abunin A. A., Abunina M. A. (2016). Space Weather Forecast Center (IZMIRAN). *Practical aspects of heliogeophysics: materials of the special section “Practical aspects of space weather science”*, 22–31 (in Russian). URL: <http://www.iki.rssi.ru/books/2016gelioph.pdf>.
9. Plainaki C., Antonucci M., Bemporad A. at all (2020). Current state and perspectives of Space Weather science in Italy. *Journal Space Weather Space Clim.*, Vol. 10, 6. URL: <https://doi.org/10.1051/swsc/2020003>.
10. Camporeale E. (2019). The Challenge of Machine Learning in Space Weather: Nowcasting and Forecasting. *Space Weather*, Vol. 17, Iss. 8, 1166–1207. URL: <https://doi.org/10.1029/2018SW002061>.
11. Sexton E. S. (2019). Kp forecasting with a recurrent neural network /Ernest Scott Sexton, Katariina Nykyri and Xuanye Ma. *Journal Space Weather Space Clim.*, Vol. 9, A19. URL: <https://doi.org/10.1051/swsc/2019020>.
12. Curto J. J. (2020). Geomagnetic solar flare effects: a review. *J. Space Weather Space Clim.*, Vol. 10, 27. URL: <https://doi.org/10.1051/swsc/2020027>.
13. Koshovyy V., Ivantyshyn O., Mezentsev V., Rusyn B., Kalinichenko M. (2020). Influence of active cosmic factors on the dynamics of natural infrasound in the Earth's atmosphere. *Romanian Journal of Physics*, Vol. 65, 813. URL: https://rjp.nipne.ro/2020_65_9-10/RomJPhys.65.813.pdf.

ARCHITECTURE OF INTELLECTUAL SYSTEM FOR RESEARCH OF SPACE WEATHER PARAMETERS

Danylo Ivantyshyn¹, Yevhen Burov², Vasyl Lytvyn³

Lviv Polytechnic National University

¹ danylo.ivantyshyn@gmail.com, ORCID 0000-0002-1530-3026

² yevhen.v.burov@lpnu.ua, ORCID 0000-0001-8653-1520

³ vasy117.lytvyn@gmail.com, ORCID -0000-0002-9676-0180

© Ivantyshyn D.-N., Burov Ye., Lytvyn V., 2021

Has been carried out analysis of the subject area and main functions of the intellectual system for research of space weather parameters are identified. The model of static structure of intellectual system is developed as well as its dynamic aspects are modeled. Also is constructed an architecture of intellectual system for research of space weather parameters on the basis of “client-server” two-level model. The scientific novelty of the obtained results stands on developed model of the intellectual system for research of space weather parameters. The practical significance of the intellectual system lies in its capabilities: automated collection and processing of data on the manifestations of solar activity; storing information in the database; data analysis and establishing links between helio- and geo-activity indicators, as well as forecasting geophysical disturbances caused by cosmic factors.

Key words: intellectual system; information model; architecture; solar activity; solar-terrestrial connections.