

УДК 004.9:004.5

ВПЛИВ РЕАЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ДАНИХ У ДОПОВНЕНІЙ РЕАЛЬНОСТІ

О. В. Литовченко, Б. І. Мозіль, І. І. Думанський

*Національний університет «Львівська політехніка»,
вул. Князя Романа, 5, Львів, 79005, Україна*

Стаття присвячена аналізу впливу реального середовища на ефективність візуалізацій даних у доповненій реальності (AR). Систематизовано наукові дослідження, що розкривають ключові виклики та інноваційні рішення у цій галузі. Розглянуто перехід від суб'єктивних до об'єктивних мультимодальних методів вимірювання когнітивного навантаження, зокрема з використанням технології відстеження рухів очей, що є основою для створення біоадаптивних інтерфейсів. Проаналізовано стратегії зменшення візуального безладу, такі як групування міток, та висвітлено тенденцію до розробки адаптивних систем на базі штучного інтелекту, що динамічно коригують стиль візуалізації для забезпечення перцептивної когерентності. Проаналізовано інноваційні підходи до просторового розміщення контенту, включаючи прив'язку до об'єктів та використання нетрадиційних поверхонь, та їхній ергономічний вплив на продуктивність користувача, зокрема компроміс між швидкістю та точністю при виборі методу прив'язки контенту до тіла користувача в мобільних сценаріях.

Ключові слова: візуалізація даних, доповнена реальність, AR, когнітивне навантаження, візуальний безлад, ситуативна аналітика, адаптивні інтерфейси, людино-комп'ютерна взаємодія.

Постановка проблеми. Доповнена реальність (AR) трансформує способи взаємодії людини з цифровою інформацією, накладаючи віртуальні дані на фізичний світ. Це відкриває безпрецедентні можливості для візуалізації даних у таких сферах, як промисловість, медицина, освіта та навігація. Однак ефективність AR-візуалізацій не є абсолютною, вона критично залежить від контексту реального середовища, в якому вони відображаються. На відміну від традиційних екранних інтерфейсів, що існують на обмеженому цифровому полотні, AR-контент змушений конкурувати за увагу користувача з динамічним, непередбачуваним і часто візуально захаращеним реальним світом. Це створює унікальні виклики для людського сприйняття, що може призводити до підвищеного когнітивного навантаження, зниження читабельності інформації та, як наслідок, до неефективного прийняття рішень. Таким чином, існує нагальна науково-практична потреба у дослідженні та систематизації знань про те, як фактори реального середовища впливають на сприйняття та ефективність AR-візуалізацій, з метою розроблення більш ергономічних, інтуїтивних та адаптивних людино-комп'ютерних інтерфейсів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Останнім часом наукові дослідження зосереджені на когнітивних та перцептивних аспектах AR. Значна увага приділяється методам вимірювання когнітивного навантаження, де спостерігається зсув від традиційних суб'єктивних шкал до об'єктивних фізіологічних показників, отриманих у реальному часі [1, 2]. Технологія відстеження рухів очей стала одним із ключових інструментів у цій галузі, дозволяючи аналізувати такі метрики, як тривалість фіксацій та розширення зіниць, для оцінки розумових зусиль [3]. Проблема візуального безладу, що виникає через накладання віртуальних елементів на складний фон, є ще одним центральним напрямком досліджень [4]. Науковці пропонують та оцінюють різні техніки керування розміщенням міток, зокрема їх групування, для підвищення продуктивності користувачів [5]. Для систематизації підходів до проектування розробляються дизайн-патерни ситуативних візуалізацій [6].

Важливим фактором, що впливає на продуктивність, є індивідуальні когнітивні здібності користувача, особливо просторова візуалізація [7]. Дослідження показують, що AR може не тільки вимагати високих просторових навичок, але й слугувати інструментом для їхнього розвитку та тренування [8], а також для «вивантаження» частини когнітивних зусиль у середовище [9].

Вплив візуальних характеристик фону на читабельність AR-контенту також є предметом активного вивчення [10]. Це стимулює розробку адаптивних систем, які використовують штучний інтелект (ШІ) для динамічної зміни стилю візуалізації залежно від умов оточення [11, 12].

Нарешті, досліджуються інноваційні методи розміщення контенту, що виходять за межі простої фіксації на екрані, такі як прив'язка до об'єктів [13] та використання нетрадиційних поверхонь, як-от підлога чи стеля [14]. Ергономічні аспекти взаємодії в мобільних сценаріях, зокрема вплив різних методів прив'язки контенту до тіла користувача, аналізуються з точки зору компромісу між швидкістю та точністю виконання завдань [15].

Незважаючи на значний прогрес у кожному з цих напрямків, бракує систематичного узагальнення, яке б об'єднало ці результати в єдину концептуальну рамку та визначило ключові тренди і невирішені завдання для подальших досліджень.

Мета статті – систематизація та аналіз найновіших наукових досягнень щодо впливу реального середовища на сприйняття та ефективність візуалізацій даних у доповненій реальності. Для досягнення мети слід розв'язати ряд важливих завдань.

Узагальнити та порівняти сучасні підходи до вимірювання когнітивного навантаження та стратегії зменшення візуального безладу. Це включає аналіз переходу від суб'єктивних звітів до об'єктивних фізіологічних метрик, як-от відстеження погляду, та аналіз технік зменшення безладу, таких як групування міток та використання усталених дизайн-патернів.

Проаналізувати задокументовані ефекти візуального фону та умов освітлення на читабельність AR-контенту. Це передбачає дослідження того, як складність фону та динамічне освітлення впливають на читабельність, що зумовлює необхідність у системах на базі ШІ, здатних коригувати властивості візуалізації, такі як колір, контраст і прозорість, у реальному часі.

Розглянути інноваційні методи розміщення контенту та їхні ергономічні наслідки. Це охоплює огляд нових парадигм розміщення, що виходять за межі дисплеїв, як-от прив'язка до об'єктів та використання периферійних або нетрадиційних поверхонь (підлога/стеля), та оцінку їхніх ергономічних компромісів у мобільних сценаріях.

Синтезувати ці окремі напрямки досліджень для виявлення загальних технологічних тенденцій та окреслення дорожньої карти критичних, невирішених питань, які можуть спрямувати майбутні дослідження у сфері ситуативної та адаптивної AR-візуалізації.

Виклад основного матеріалу дослідження. Синтез останніх досліджень виявляє чітку траєкторію до створення високоадаптивних, контекстно-залежних AR-систем. Фундаментальним викликом є управління когнітивним навантаженням користувача – розумовими зусиллями, необхідними для одночасної обробки інформації з реального та віртуального світів. Нещодавні роботи демонструють перехід від суб'єктивних оцінок після виконання завдання до об'єктивних фізіологічних вимірювань у реальному часі. Як узагальнено в табл. 1, хоча традиційні методи залишаються корисними, фізіологічні сенсори, як-от очні трекери, надають безперервні, неупереджені дані, що є критично важливими для створення біоадаптивних систем [1, 2]. Зокрема, відстеження погляду стало найбільш послідовним методом, що використовує такі метрики, як тривалість фіксації та розширення зіниць, для розрізнення складності завдань і навіть продуктивності користувача [3]. Проте варто зауважити, що для валідної оцінки когнітивного стану користувача необхідний мультимодальний підхід, що поєднує об'єктивні та суб'єктивні дані. Цей прогрес є ключовим фактором для створення інтерфейсів, здатних динамічно адаптуватися для запобігання когнітивному перевантаженню.

Таблиця 1

Порівняння технік вимірювання когнітивного навантаження в AR

Модальність	Ключові метрики	Переваги в контексті AR	Обмеження в контексті AR
Суб'єктивна	NASA-TLX, шкали оцінювання	Низька вартість, легкість впровадження	Ретроспективність, суб'єктивні упередження, переривання робочого процесу
Продуктивність	Час виконання завдання, рівень помилок	Надає об'єктивний результат виконання завдання	Не вимірює безпосередньо розумові зусилля; може залежати від навичок користувача
Фізіологічна	Відстеження погляду: фіксації, сакади, розширення зіниць; ЕЕГ: активність мозкових хвиль	Вимірювання в реальному часі, безперервність; менша упередженість; висока чутливість до змін навантаження	Чутливість до зовнішніх факторів (напр., освітлення для зіниць); потреба у спеціалізованому обладнанні; складний аналіз даних

Прямим фактором, що спричиняє когнітивне навантаження, є візуальний безлад, який виникає, коли віртуальна інформація перекриває реальний світ або інші віртуальні елементи [4]. Для пом'якшення цієї проблеми вчені зосереджують свої дослідження на інтелектуальних стратегіях розміщення міток. Також для систематизації підходів до проектування розробляються дизайн-патерни ситуативних візуалізацій [6]. Як показано в табл. 2, дослідження, що порівнювали різні техніки маркування в захищених сценах, виявили високу ефективність групування міток для просторово згрупованих об'єктів [5]. Метод «Situating Grouped» (SG), де єдина репрезентативна мітка розміщується над групою однакових елементів, дозволив користувачам виконувати завдання значно швидше порівняно з базовим підходом «Situating Individual» (SI), де маркується кожен елемент. Хоча користувачі віддавали невелику перевагу методу «Centered Grouped» (CG) через його сприйняту простоту, різниця в продуктивності між двома методами групування не була статистично значущою. Це свідчить про те, що зменшення загальної кількості міток шляхом групування є більш критичним, ніж точне розташування самої групової мітки.

Таблиця 2

Оцінка стратегій розміщення міток для зменшення безладу

Стратегія	Принцип проектування	Ключовий висновок щодо продуктивності	Ключовий висновок щодо вподобань користувачів
Situating Individual (SI)	Одна мітка на об'єкт, розміщена безпосередньо над ним	Базова продуктивність; повільніше в захищених сценах через велику кількість міток	Сприймається як захищена та така, що надає забагато інформації для швидкої обробки
Situating Grouped (SG)	Одна репрезентативна мітка для просторового кластера однакових елементів, розміщена над групою	Значно швидший час виконання завдання порівняно з SI	Перевага над SI через чіткість та відсутність перекриття між мітками та об'єктами
Centered Grouped (CG)	Одна репрезентативна мітка для просторового кластера, розміщена в геометричному центрі групи	Немає статистично значущої різниці в продуктивності порівняно з SG	Найбільш вподобаний метод (8 з 15 учасників за те, що він «простий»)

Окрім управління екранними елементами, критично важливою є ергономіка того, як і де AR-контент відображається відносно тіла користувача, особливо в мобільних сценаріях, як-от взаємодія з інформацією під час ходьби. Дослідження, що систематично вивчали різні методи прив'язки контенту [15], виявляють фундаментальний компроміс між швидкістю та точністю (табл. 3). Контент, прив'язаний до голови, який залишається нерухомим у полі зору користувача, дозволяє найшвидшу взаємодію та має найменший негативний вплив на ходьбу. Однак це

може призводити до більшої кількості пропущених цілей у складних віртуальних завданнях. І навпаки, контент, прив'язаний до руки, змушує до більш свідомої, а отже, повільнішої взаємодії, але призводить до значно меншої кількості помилок у вимогливих завданнях. Також, щоб звільнити пряму лінію зору користувача, дослідники систематично вивчають підлогу та стелю як зони для розміщення AR-контенту [14]. Дослідження показують, що ці зони найкраще підходять для вторинної інформації низької складності (наприклад, навігаційні стрілки, сповіщення), яка вимагає лише швидкого погляду. Підлога загалом є кращою за стелю з точки зору ергономічного комфорту (менше навантаження на шию).

Таблиця 3

**Ергономічний вплив прив'язки AR-контенту в мобільних сценаріях
під час ходьби**

Метод прив'язки	Вплив на продуктивність ходьби	Вплив на продуктивність віртуального завдання	Сприймане навантаження
Прив'язка до голови	Найменший вплив; підтримував найефективніший баланс між завданнями	Найшвидший час реакції, але більше пропущених відповідей у складних завданнях	Найнижче сприймане навантаження
Прив'язка до руки	Сповільнював фізичний темп, заохочуючи до більш свідомого фокусування на шляху	Повільніший час реакції, але значно менше пропущених відповідей у складних завданнях	Найвище сприймане навантаження
Прив'язка до тулуба	Призводив до повільніших, більш обережних кроків; найменш ефективний стиль ходьби	Повільніші відповіді та більше пропущених відповідей	Загалом найменш сприятливий варіант для тривалої взаємодії

В підсумку можна сказати, що ідеальна адаптивна система не повинна мати фіксованої стратегії прив'язки, а має динамічно змінювати її на основі неявних вимог поточного завдання користувача – надаючи пріоритет швидкості для навігації та точності для введення даних.

Висновки. Аналіз останніх наукових досягнень дозволяє зробити наступні висновки. По-перше, для оцінки когнітивного навантаження в AR стандартом стають об'єктивні мультимодальні вимірювання в реальному часі, що відкриває шлях до створення біоадаптивних інтерфейсів. По-друге, для боротьби з візуальним безладом та впливом складного фону домінуючою тенденцією є розробка адаптивних систем на базі ШІ, які динамічно коригують як стиль візуалізації, так і стратегії розміщення міток. По-третє, у сфері ергономіки спостерігається зсув до просторово-орієнтованого дизайну, де інформація розумно розміщується в 3D-середовищі та відносно тіла користувача, враховуючи вимоги конкретного завдання.

Для повної реалізації потенціалу AR-візуалізацій у реальному світі необхідно зосередити зусилля на наступних напрямках майбутніх досліджень.

Більшість сучасних досліджень є короткостроковими лабораторними експериментами. Існує критична потреба в лонгітюдних дослідженнях для розуміння довгострокових когнітивних та ергономічних ефектів щоденного використання AR. Як адаптуються навички з часом? Чи не призводить постійне використання AR-підтримки до атрофії вроджених просторових здібностей? Як змінюється сприйняття візуального безладу та когнітивне навантаження після тижнів або місяців регулярної взаємодії?

Хоча «візуальний безлад» є визнаною проблемою, цьому поняттю бракує стандартизованого, обчислювально-вимірюваного визначення для змішаної реальності. Майбутні дослідження повинні зосередитися на розробці об'єктивних метрик для AR-безладу, які б враховували не лише кількість віртуальних елементів, але й складність реального фону, динаміку сцени та семантичну релевантність інформації. Такі метрики можуть бути використані для порівняльного аналізу та тренування адаптивних систем.

Сучасні дослідження переважно зосереджені на візуальному каналі. Перспективним напрямом дослідження є вивчення того, як інші модальності, такі як просторове аудіо та тактильний зворотний зв'язок, можуть бути використані для представлення даних та сповіщень. Це дозволить розвантажити переобтяжений візуальний канал, що є особливо важливим у мобільних контекстах та для користувачів з вадами зору.

Дослідження розміщення контенту на підлозі, стелі та периферії є лише початком. Майбутні роботи повинні дослідити цілісну систему інформації, розробляючи керовані ШІ фреймворки, які керують потоком інформації між фокальними, периферійними, фоновими та прив'язаними дисплеями. Таке управління має базуватися на глибокому розумінні завдання, контексту та когнітивного стану користувача, створюючи безшовний та інтуїтивно зрозумілий інформаційний досвід.

У міру того, як керовані штучним інтелектом адаптивні системи стають все більш потужними та персоналізованими, виникає все більше етичних питань. Які наслідки для приватності мають системи, що постійно відстежують фізіологічний стан користувача? Як запобігти «темним патернам», коли інтерфейс може адаптуватися для маніпулювання увагою або рішеннями користувача? Майбутні дослідження в галузі AR-візуалізацій повинні вирішувати ці етичні дилеми, розробляючи принципи прозорого, контрольованого користувачем та етичного дизайну для біоадаптивних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Suryani M., Santoso H. B., Schrepp M. та ін. Role, methodology, and measurement of cognitive load in computer science and information systems research. IEEE Access. 2024.
2. Suzuki Y., Wild F., Scanlon E. Measuring cognitive load in augmented reality with physiological methods: A systematic review. Journal of Computer Assisted Learning. 2024. Vol. 40, № 2. P. 375–393.

3. Suzuki Y., Wild F., Scanlon E. Measuring Cognitive Load with Eye-Tracking During Mental Rotation with 2D and 3D Visualization in AR. In: International Conference on Immersive Learning. Cham : Springer Nature Switzerland, 2024. P. 34–48.
4. Chiossi F., Trautmannsheimer I., Ou C. та ін. Searching across realities: Investigating erps and eye-tracking correlates of visual search in mixed reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2024.
5. Park J. H., Roper B., Arezoumand A., Tran T. Exploring AR Label Placements in Visually Cluttered Scenarios. *arXiv preprint*. 2025. *arXiv:2507.00198*.
6. Lee B., Sedlmair M., Schmalstieg D. Design patterns for situated visualization in augmented reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2023. Vol. 30, №1. P. 1324–1335.
7. Tandon S., Abdul-Rahman A., Borgo R. Measuring effects of spatial visualization and domain on visualization task performance: a comparative study. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2022. Vol. 29, № 1. P. 668–678.
8. Eh Phon D. N., Murli N., Che Lah N. H., Hashim S. The Impact of Augmented Reality on Spatial Visualization Ability and Science Achievement: Exploring their Correlation. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*. 2025. Vol. 15, № 4. P. 1221–1228.
9. Patel D. B. Incorporating Augmented Reality into Data Visualization for Real-Time Analytics. *Utilitas Mathematica*. 2025. Vol. 122, № 1. P. 3216–3230.
10. Guo F., Chen J., Li M. та ін. Effects of visual complexity on user search behavior and satisfaction: an eye-tracking study of mobile news apps. *Universal Access in the Information Society*. 2022. Vol. 21, № 4. P. 795–808.
11. Rasch J., Müller F., Chiossi F. A Vision for AI-Driven Adaptation of Dynamic AR Content to Users and Environments. *arXiv preprint*. 2025. *arXiv:2504.16562*.
12. Tomkins A., Lange E. Planning and designing natural and urban environments with an adaptive visualization framework: the case of Pazhou Island, Guangzhou, Pearl River Delta. *Land*. 2023. Vol. 12, № 2. Art. 377.
13. Davari-Najafabadi S. Intelligent Augmented Reality (iAR): Context-aware Inference and Adaptation in AR. 2024.
14. Satkowski M., Rzayev R., Goebel E., Dachzelt R. ABOVE & BELOW: Investigating ceiling and floor for augmented reality content placement. In: 2022 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR). IEEE, 2022. P. 518–527.
15. Rasch J., Wilhalm M., Müller F., Chiossi F. AR You on Track? Investigating Effects of Augmented Reality Anchoring on Dual-Task Performance While Walking. In: Proceedings of the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 2025. P. 1–21.
16. Xiao R., Benko H. Augmenting the field-of-view of head-mounted displays with sparse peripheral displays. In: Proceedings of the 2016 CHI conference on human factors in computing systems. 2016. P. 1221–1232.

REFERENCES

1. Suryani, M., Santoso, H. B., Schrepp, M., Aji, R. F., Hadi, S., Sensuse, D. I., & Suryono, R. R. (2024). Role, methodology, and measurement of cognitive load in computer science and information systems research. *IEEE Access*.

2. Suzuki, Y., Wild, F., & Scanlon, E. (2024). Measuring cognitive load in augmented reality with physiological methods: A systematic review. *Journal of Computer Assisted Learning*, 40(2), 375-393.
3. Suzuki, Y., Wild, F., & Scanlon, E. (2024, June). Measuring Cognitive Load with Eye-Tracking During Mental Rotation with 2D and 3D Visualization in AR. In *International Conference on Immersive Learning* (pp. 34-48). Cham: Springer Nature Switzerland.
4. Chiossi, F., Trautmannsheimer, I., Ou, C., Gruenefeld, U., & Mayer, S. (2024). Searching across realities: Investigating erps and eye-tracking correlates of visual search in mixed reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*.
5. Park, J. H., Roper, B., Arezoumand, A., & Tran, T. (2025). Exploring AR Label Placements in Visually Cluttered Scenarios. *arXiv preprint arXiv:2507.00198*.
6. Lee, B., Sedlmair, M., & Schmalstieg, D. (2023). Design patterns for situated visualization in augmented reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 30(1), 1324-1335.
7. Tandon, S., Abdul-Rahman, A., & Borgo, R. (2022). Measuring effects of spatial visualization and domain on visualization task performance: a comparative study. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 29(1), 668-678.
8. Eh Phon, D. N., Murli, N., Che Lah, N. H., Hashim, S. (2025). The Impact of Augmented Reality on Spatial Visualization Ability and Science Achievement: Exploring their Correlation. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 15(4), 1221-1228.
9. Patel, D. B. (2025). Incorporating Augmented Reality into Data Visualization for Real-Time Analytics. *Utilitas Mathematica*, 122(1), 3216-3230.
10. Guo, F., Chen, J., Li, M., Lyu, W., & Zhang, J. (2022). Effects of visual complexity on user search behavior and satisfaction: an eye-tracking study of mobile news apps. *Universal Access in the Information Society*, 21(4), 795-808.
11. Rasch, J., Müller, F., & Chiossi, F. (2025). A Vision for AI-Driven Adaptation of Dynamic AR Content to Users and Environments. *arXiv preprint arXiv:2504.16562*.
12. Tomkins, A., & Lange, E. (2023). Planning and designing natural and urban environments with an adaptive visualization framework: the case of Pazhou Island, Guangzhou, Pearl River Delta. *Land*, 12(2), 377.
13. Davari-Najafabadi, S. (2024). Intelligent Augmented Reality (iAR): Context-aware Inference and Adaptation in AR.
14. Satkowski, M., Rzayev, R., Goebel, E., & Dachsel, R. (2022, October). ABOVE & BELOW: Investigating ceiling and floor for augmented reality content placement. In *2022 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)* (pp. 518-527). IEEE.
15. Rasch, J., Wilhalm, M., Müller, F., & Chiossi, F. (2025, April). AR You on Track? Investigating Effects of Augmented Reality Anchoring on Dual-Task Performance While Walking. In *Proceedings of the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1-21).
16. Xiao, R., & Benko, H. (2016, May). Augmenting the field-of-view of head-mounted displays with sparse peripheral displays. In *Proceedings of the 2016 CHI conference on human factors in computing systems* (pp. 1221-1232).

doi: 10.32403/0554-4866-2025-2-90-156-164

EFFECTS OF THE PHYSICAL ENVIRONMENT ON DATA VISUALIZATION EFFECTIVENESS IN AUGMENTED REALITY

O. V. Lytovchenko, B. I. Mozil, I. I. Dumanskyi

*Lviv Polytechnic National University,
Kniazia Romana St, 5, Lviv, 79005, Ukraine*

This article analyzes the influence of real-world environments on the effectiveness of augmented reality (AR) data visualizations. AR content must compete with dynamic, cluttered backgrounds, creating significant cognitive challenges for users. This review systematizes recent scientific advancements addressing these core issues.

A primary focus is the shift from subjective self-reports to objective, real-time physiological measurements of cognitive load, particularly using eye-tracking metrics such as fixation duration and pupil dilation. These indicators are foundational for creating bio-adaptive interfaces that dynamically adjust visualizations to prevent user overload.

The article also analyzes strategies for mitigating visual clutter, highlighting effective label management techniques, such as grouping. It examines the influence of background characteristics on legibility, underscoring the trend toward AI-driven systems that automatically adjust visualization styles (e.g., contrast, outlines) to maintain readability and perceptual coherence.

Finally, the analysis covers innovative approaches to spatial content placement and ergonomics. It discusses moving beyond head-locked displays to paradigms like object-anchoring and utilizing unconventional surfaces (such as the floor, ceiling, or periphery) to free the user's central vision. The ergonomic implications for mobile scenarios are explored, particularly the speed-accuracy trade-off associated with different content anchoring methods (e.g., head vs. hand).

In conclusion, this article discusses that the future of effective AR lies in holistic, context-aware systems that dynamically adapt to the environment, the user's real-time cognitive state, individual traits, and task demands.

Keywords: data visualization, augmented reality, AR, cognitive load, visual clutter, situated analytics, adaptive interfaces, human-computer interaction.

Стаття надійшла до редакції 14.10.2025.

Received 14.10.2025.