

<https://doi.org/10.26565/2074-8167-2025-57-02>
УДК 378.046-021.68:004:5

Ірина Павлівна Воротникова

кандидат педагогічних наук, доцент,

завідувач кафедри природничо-математичної освіти і технологій

i.vorotnykova@kubg.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1211-8885>

Інститут післядипломної освіти

Київського столичного університету імені Бориса Грінченка

проспект П. Тичини 22 а, Київ, Україна, 02152

МОДЕЛЬ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ПРИРОДНИЧО-МАТЕМАТИЧНОЇ ПІСЛЯДИПЛОМНОЇ ПЕДАГОГІЧНОЇ ОСВІТИ

Статтю присвячено побудові й аналізу можливостей реалізації моделі цифрової трансформації професійного розвитку вчителів природничої і математичної галузей на основі аналізу наявних моделей цифрової трансформації та методики впровадження цифрових технологій в освіту та висвітленню основних стратегій і напрямів цифрової трансформації природничої та математичної післядипломної освіти як умови цифрової трансформації професійного розвитку вчителів. У дослідженні застосовано теоретичні методи наукового пізнання, зокрема аналіз, синтез, порівняння, узагальнення та моделювання.

Аналіз наукових досліджень і праць з питань цифрової трансформації освіти та досвід професійного розвитку вчителів природничої та математичної галузей в післядипломній освіті дав змогу теоретично обґрунтувати модель цифрової трансформації професійного розвитку вчителів природничої та математичної галузей на основі міжнародних стандартів DigCompEdu та моделей впровадження цифрових технологій SAMR, TRACK; окреслити підходи до цифрової трансформації освіти, вимоги професійного стандарту вчителя та міжнародні моделі впровадження цифрових технологій.

Представлена структурно-функціональна модель цифрової трансформації інтегрує нормативні, організаційні, ресурсні, суб'єктні, процесуальні та результативні компоненти. Модель побудовано з урахуванням положень системного, компетентнісного, діяльнісного, андрагогічного, ШІ-орієнтованого підходів і відображає логіку цифрової трансформації післядипломної освіти як цілісного освітнього процесу.

Модель реалізується на стратегічному, організаційно-управлінському, технологічному та соціально-гуманітарному рівнях. Функціонально модель забезпечує нормативне узгодження, організацію цифрового освітнього процесу, оновлення змісту професійного розвитку, впровадження інноваційних цифрових технологій та аналітику результатів. Результативний компонент визначається на індивідуальному рівні для вчителя, педагогічної спільноти, закладу післядипломної освіти та загальному рівні системи освіти і розглядається основою для формування цифрової компетентності педагогів, розвитку їхньої професійної автономії та модернізації системи післядипломної освіти. Визначено ключові механізми реалізації моделі і педагогічні умови ефективного впровадження моделі.

Ключові слова: *цифрова трансформація; післядипломна педагогічна освіта; природничо-математична освіта; підвищення кваліфікації; професійний розвиток.*

Як цитувати: Воротникова І. П. Модель цифрової трансформації природничо-математичної післядипломної педагогічної освіти. *Наукові записки кафедри педагогіки*. 2025. № 57. С. 17–29. <https://doi.org/10.26565/2074-8167-2025-57-02>

In cites: Vorotnykova, I. (2025). Model of digital transformation of natural and mathematical postgraduate teacher education. *Scientific notes of the pedagogical department*. 2025. № 57. 17–29. <https://doi.org/10.26565/2074-8167-2025-57-02> [in Ukrainian].

Постановка проблеми. Цифрова трансформація післядипломної природничо-математичної освіти є ключовою умовою модернізації освітньої системи та забезпечення якісного професійного розвитку педагогів у контексті швидкого зростання вимог до професійної та цифрової компетентності сучасного вчителя. В умовах глобальних трансформацій, пов'язаних із переходом до економіки знань, зростанням ролі високих технологій, інтенсивним впровадженням штучного інтелекту, аналітики даних, VR/AR-симуляцій і цифрових лабораторій, саме природничо-математична освіта стає однією з найбільш динамічних і технологічно навантажених галузей, що потребує якісно нових підходів до післядипломної підготовки педагогів. Педагоги цієї сфери працюють зі складними цифровими середовищами, симуляторами, комп'ютерним моделюванням, STEM-комплексами, робототехнікою та віддаленими лабораторіями, тому їхній професійний розвиток не може базуватися на загальних моделях цифрової компетентності, а потребує спеціалізованих інструментів, методик і технологій навчання дорослих [14; 18; 2].

Цифрова трансформація післядипломної педагогічної освіти вчителів природничої та математичної галузей є обов'язковою умовою збереження якості освіти в умовах війни, післявоєнного відновлення та переходу до цифрового суспільства. Інтеграція великих даних, штучного інтелекту, віртуальних та змішаних навчальних середовищ, аналітики навчання у системі підвищення кваліфікації вчителів природничих і математичних дисциплін потребує не лише оновлення окремих курсів або інструментів, а й побудови цілісної моделі цифрової трансформації природничо-математичної післядипломної педагогічної освіти, яка поєднує технологічні інновації з предметно-орієнтованою методикою і форматами професійного розвитку, що здатні забезпечити персоналізоване навчання, обмін досвідом у сучасному цифровому інформаційно-освітньому середовищі. У бібліометричних аналізах зазначається зростання частки наукових досліджень, присвячених цифровій трансформації освіти, що засвідчує її глобальну актуальність і підтверджує доцільність розроблення нових моделей та інструментів для вдосконалення професійного розвитку педагогів [24]. У контексті сучасних освітніх трансформацій учитель постає ключовою фігурою; від рівня його готовності, цифрової й проектно-дослідницької компетентності залежить якість STEM-нав-

чання та результативність освітніх інновацій. Підготовка вчителів до впровадження STEM-освіти є ключовою умовою модернізації природничо-математичної галузі та формування компетентностей, необхідних для функціонування в умовах цифрової економіки та суспільства знань. STEM-підходи інтегрують природничі науки, технології, інженерію та математику, забезпечуючи міждисциплінарність, розвиток критичного, дослідницького й інженерного мислення, вміння працювати в команді й застосовувати знання в реальних практичних ситуаціях.

У цьому контексті створення моделі цифрової трансформації післядипломної природничо-математичної освіти постає як науково обґрунтована необхідність, зумовлена потребою систематизувати, інтегрувати й впорядкувати інтенсивні процеси цифровізації, що відбуваються в освітній сфері. Така модель дозволяє визначити структурні та функціональні компоненти цифрової модернізації післядипломної освіти, охоплюючи цифрову інфраструктуру, інформаційно-освітнє середовище, оновлений зміст професійного розвитку, впровадження штучного інтелекту, систем освітньої аналітики, VR/AR-технологій, STEM-інструментарію та платформ персоналізованого навчання педагогів, забезпечує наукову рамку для побудови сучасних освітніх програм, орієнтованих на розвиток цифрової STEM-компетентності педагогів, інтеграцію рамки цифрової компетентності DigCompEdu [25], що відповідає міжнародним документам і рекомендаціям Європейської Комісії, ЮНЕСКО та OECD [30; 1].

Важливість моделі також полягає у тому, що вона забезпечує системність і цілісність процесів цифрової трансформації післядипломної освіти, долаючи ризики фрагментарності, несумісності рішень і відсутності стратегічного бачення, які спостерігаються при стихійному впровадженні цифрових інновацій. Наявність моделі забезпечує концептуальні та методологічні засади для формування індивідуальних траєкторій професійного розвитку педагогів, що базуються на принципах гнучкості, адаптивності, персоналізації та використання освітньої аналітики. У моделі визначаються механізми переходу від традиційних курсів підвищення кваліфікації до цифрових освітніх екосистем, у яких професійний розвиток стає неперервним, даних-орієнтованим, технологічно збагаченим і відкритим до інновацій.

Наукове значення моделі цифрової трансформації післядипломної природничо-ма-

тематичної освіти полягає в тому, що вона забезпечує концептуальний фундамент для модернізації професійної підготовки педагогів у відповідь на виклики цифрової епохи, гарантує відповідність української системи післядипломної освіти міжнародним стандартам цифрової компетентності та дає можливість формувати нову генерацію педагогів, здатних ефективно працювати у високотехнологічному, інформаційно насиченому та STEM-орієнтованому освітньому середовищі.

Цифрова трансформація є багатовимірним процесом, що має інтегрувати різноманітні моделі впровадження цифрових технологій, наприклад, SAMR, TRACK, DigCompEdu, та використовувати підходи дослідницького й проблемно-орієнтованого навчання, віртуальні середовища, долати бар'єри інституційної готовності, опору змінам і дефіцит валідації моделей в післядипломній педагогічній освіті [4; 8; 9].

Цифрова трансформація післядипломної освіти постає ключовою системною умовою цифрової трансформації професійного розвитку педагогів. Такий взаємозв'язок обумовлений тим, що саме післядипломні інституції формують інституційні, інфраструктурні, нормативні та методичні засади, які забезпечують можливість переходу педагогів до цифрових форматів професійного навчання.

На інституційному рівні цифрова трансформація післядипломної освіти формує цифрові політики, стандарти професійного розвитку, механізми сертифікації та цифрового адміністрування, що є передумовою впровадження цифрових компетентнісних рамок, як-от DigCompEdu [4]. Інфраструктурний рівень передбачає створення цифрових освітніх екосистем, хмарних сервісів, систем дистанційного навчання та аналітичних платформ, які забезпечують доступ педагогів до сучасних цифрових інструментів та ресурсів [30].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Систематизований огляд моделей і рамок цифрової трансформації освіти дозволяє стверджувати, що світові дослідження зосереджено насамперед на:

- моделях цифрової трансформації вищої освіти (моделі на основі великих даних, аналітика навчання, цифрові університети [12–14; 18; 20];
- рамках цифрової та ШІ-компетентності викладачів (DigCompEdu), інтеграції SAMR, TRACK, PBL, віртуальних навчальних середовищ, мобільних та інтерактивних технологій у професійний розвиток майбутніх і працюючих

викладачів. Суттєвий масив публікацій стосується професійного розвитку вчителів на основі TRACK і DigCompEdu [26; 27], розвитку цифрової компетентності обчислювального мислення, використання мобільних, інтерактивних, імерсивних технологій та ШІ у підготовці вчителів математики та природничих дисциплін. Систематичні огляди міжнародних досліджень [9] засвідчують, що модель SAMR є одним із найпоширеніших інструментів для дослідження цифрової інтеграції в навчання. Дослідники наголошують, що SAMR активно використовують: для оцінювання цифрової зрілості педагогів та закладів освіти, у програмах професійного розвитку вчителів, під час проектування цифрових освітніх середовищ і курсів, для аналізу ефективності застосування VR/AR, мобільного навчання, STEM-технологій, у підготовці вчителів природничо-математичного профілю. Модель SAMR (Substitution – Augmentation – Modification – Redefinition) є однією з найвідоміших концептуальних рамок, що описує рівні інтеграції цифрових технологій у навчальний процес. Її значущість для цифрової трансформації освіти полягає в тому, що SAMR не лише класифікує способи використання цифрових інструментів, а й задає логіку педагогічного переосмислення навчання відповідно до можливостей технологій [28; 8; 9].

- ролі лідерства, організаційної підтримки та професійних спільнот у сталому впровадженні цифрових технологій та ШІ у навчання. У наявних працях досліджено вплив організаційної підтримки й цифрового лідерства на розвиток цифрової грамотності педагогів та їх готовність до використання ІКТ і ШІ, у тому числі шляхом розподіленого лідерства та е-лідерства. Окремий кластер публікацій присвячено бар'єрам цифрової трансформації та опору викладачів, емоційним аспектам сприйняття ШІ, проблемам академічної доброчесності в епоху генеративного ШІ [11; 23].

У дослідженнях, присвячених цифровій трансформації вищої та післядипломної освіти, наголошується, що створення ефективних моделей цифрової трансформації потребує інтеграції штучного інтелекту, аналітики великих даних, хмарних сервісів та інших ІКТ, здатних оптимізувати освітні процеси й забезпечити їх гнучкість [18]. Значну увагу здобуває цифрова аналітика як інструмент управління освітніми процесами та побудови індивідуальних траєкторій навчання, що особливо важливо для післядипломної освіти педагогів [21]. Паралель-

но з цим у сучасних моделях цифрової освіти простежується тенденція до проектування комплексних цифрових екосистем, що охоплюють інфраструктуру, цифрові ресурси, кадрову підтримку та інтелектуальні інструменти для управління навчанням [22].

Важливою складовою цифрової трансформації стає професійний розвиток педагогів, який має спиратися на науково обґрунтовані принципи, що забезпечують ефективність навчання дорослих. На думку міжнародних експертів, якість професійного розвитку значно зростає за умов системності, практико-орієнтованості, використання технологій та можливостей персоналізації навчальних траєкторій [23]. Цифрова трансформація освіти вимагає розроблення стратегій, що поєднують технологічні інновації, управлінську гнучкість і цифрове лідерство, оскільки ефективна цифровізація залежить від організаційної спроможності навчальних інституцій [24].

Трансформації педагогічних моделей у цифровому середовищі присвячено праці, в яких аналізують ефективність сучасних навчальних стратегій та пропонують рекомендації щодо їх адаптації до потреб освіти 4.0 та 5.0 [30]. У контексті післядипломної педагогічної освіти особливо актуальними є дослідження, які пропонують концептуальні підходи до цифрової трансформації підготовки та професійного розвитку педагогів в університетах Китаю [30; 1], моделі цифрової трансформації програм професійних ступенів, а також сучасні рамки оцінювання цифрової компетентності педагогів, включно з DigCompEdu [4].

Підвищену увагу дослідників здобуває цифрове лідерство та організаційна гнучкість як чинники, що впливають на успішність цифрових трансформацій у закладах освіти [1]. Водночас у публікаціях аналізується роль штучного інтелекту та цифрових інструментів у формуванні нових освітніх бізнес-моделей та сценаріїв застосування ШІ у навчальному середовищі [8].

Наукові результати щодо цифрової трансформації природничо-математичної освіти в Україні вказують на гостру потребу модернізації методик, ресурсного забезпечення та розвитку цифрових компетентностей учителів, особливо в умовах війни та дистанційного формату навчання [6; 7]. Дослідження показують, що цифрова компетентність педагогів, здатність працювати з інноваційними інструментами та належне функціонування ІОС відчутно впливають на якість викладання природничо-математичних дисциплін [2].

Систематичні огляди цифрової трансформації освіти на міжнародному рівні підтверджують, що розвиток цифрової інфраструктури, аналітики даних, цифрових платформ і хмарних сервісів є базовими елементами ефективною цифровою трансформації вищої та післядипломної освіти [29; 30; 1].

Цифрова трансформація програм післядипломної освіти має здійснюватися на основі навчальної аналітики, з акцентом на необхідності прийняття рішень з урахуванням даних і розвитку інституційної готовності до цифрових змін. Окремий блок досліджень присвячено валідації моделей цифрової компетентності вчителів (DigCompEdu, TDCM, національної моделі Китаю, ЄС, Латинської Америки) [21].

Українські дослідження присвячено питанням теоретико-методичних засад цифровізації й цифрової трансформації освіти (В. Биков, О. Спірін, О. Пінчук) [3; 4; 6; 9], проектування комп'ютерно-орієнтованих та інформаційно-освітніх середовищ закладів післядипломної освіти (К. Колос, О. Проценко, О. Овчарук) [22], умов формування цифрової компетентності вчителів у післядипломній освіті, організації професійного розвитку вчителів природничо-математичної освіти та технологій у цифровому освітньому середовищі (І. Вороникова, Н. Сороко) [6], аналізу ролі цифрових технологій у розвитку STEM-екосистем і якості шкільної природничо-математичної освіти (Л. Гриневич, Н. Морзе, В. Вембер, М. Бойко, Н. Валько та ін.) [16; 7].

Дослідження викликів, пов'язаних із цифровою трансформацією освіти та професійним розвитком учителів, показує, що впровадження цифрових технологій у післядипломну природничо-математичну освіту потребує системних рішень, які охоплюють інфраструктуру, цифрову компетентність педагогів, методичні системи та організаційні моделі.

Учений В. Биков наголошує, що цифрова трансформація є не лише технологічним оновленням, а й комплексним соціально-освітнім процесом, який потребує створення сучасної комп'ютерно-технологічної платформи освіти та розвитку цифрової культури педагогів [12].

Дослідники зазначають важливість цифрового оновлення STEM-освіти та необхідність упровадження сучасних цифрових інструментів, віртуальних лабораторій, симуляцій і хмарних сервісів у підготовку та підвищення кваліфікації педагогів та акцентують, що підготовка вчителів природничих дисциплін має ґрунтуватися на формуванні дослідницьких,

цифрових та інженерних компетентностей, що можливе лише за умов системної модернізації післядипломної освіти [10].

Інтелектуальні інформаційні технології відіграють ключову роль у цифровій трансформації освіти, а використання штучного інтелекту, освітньої аналітики, великих даних та адаптивних систем сприяє переходу до персоналізованих траєкторій професійного розвитку, адже засвідчує, що педагог має володіти не лише цифровими інструментами, а й уміннями критично оцінювати результати аналітики, застосовувати їх для визначення потреб навчання та вдосконалення власної діяльності [15].

Особливостями організації професійного розвитку педагогів дорослих в умовах цифровізації є важливість врахування андрагогічних принципів, модульності, інтерактивності та практичної спрямованості навчання з використанням цифрових платформ для організації індивідуальних траєкторій навчання та розвитку цифрової компетентності педагогів [11].

Підготовка вчителів старшої школи у провідних країнах ґрунтується на активному використанні цифрових, мобільних та імерсивних технологій, що забезпечують гнучкість і персоналізацію навчання, що засвідчує тенденції переходу до неперервного професійного розвитку педагогів на основі цифрових екосистем, мікрокваліфікацій, цифрового менторингу та онлайн-спільнот [17].

Цифрова трансформація післядипломної природничо-математичної освіти має спиратися на: розвиток цифрових та ШІ-компетентностей педагогів, модернізацію інформаційно-освітнього середовища, використання інтелектуальних, інтерактивних, імерсивних та віртуальних технологій, впровадження персоналізованих траєкторій професійного розвитку, інтеграцію та адаптацію міжнародних моделей упровадження у національну систему післядипломної освіти.

Аналіз міжнародних і вітчизняних наукових розвідок засвідчив брак цілісної моделі цифрової трансформації саме природничо-математичної післядипломної педагогічної освіти, яка б поєднувала міжнародні стандарти та моделі (SAMR, TPACK, DigCompEdu) з особливостями української системи післядипломної освіти, нормативним полем і викликами воєнного та післявоєнного часу, дала змогу реалізувати цифрову трансформацію професійного розвитку вчителів природничо-математичних дисциплін у післядипломній освіті, враховуючи андрагогічні принципи навчання, перехід до галузевого під-

ходу, STEM/STEAM, інтенсивного використання віртуальних лабораторій, AR/VR, ШІ).

Метою статті є побудова та аналіз моделі цифрової трансформації професійного розвитку вчителів природничої та математичної галузей на основі аналізу моделей цифрової трансформації та впровадження цифрових технологій в освіту.

Для розкриття теми використано теоретичні методи: аналіз наукових досліджень та статей з питань цифрової трансформації освіти та досвід професійного розвитку вчителів природничої та математичної галузей в післядипломній освіті. Для пошуку релевантних статей за темою дослідження використано інструменти ШІ (Scopus.ai).

Виклад матеріалу дослідження і основні результати. Наукове підґрунтя переходу від традиційних моделей навчання до цифрової екосистеми післядипломної освіти, орієнтованої на потреби суспільства знань засвідчує, що цифрова трансформація в цій сфері розвивається у кількох ключових напрямках. Такими є: створення інтелектуальних освітніх платформ [28], упровадження академічної аналітики для прийняття управлінських і педагогічних рішень [21], розвиток цифрових екосистем післядипломної освіти, персоналізація професійного розвитку педагогів [7] та інтеграція інновацій у систему неперервної освіти дорослих.

У праці [28] представлено модель цифрової трансформації післядипломної підготовки в університетах Китаю, яка охоплює створення інтелектуальних освітніх платформ, оновлення механізмів управління та розвиток цифрової грамотності учасників освітнього процесу. Такий підхід дає змогу оптимізувати діяльність післядипломної освіти та узгодити її зі світовими і національними стратегіями цифровізації.

Модель цифрової трансформації магістерських програм, запропонована дослідниками [21], базується на системному використанні академічної аналітики для моніторингу успішності, вдосконалення педагогічних практик та прийняття інституційних рішень на основі великих масивів освітніх даних. У контексті підвищення кваліфікації педагогів варто виокремити модель, запропоновану науковцями [7], в якій акцентовано на персоналізованому професійному розвитку вчителів. Результати дослідження засвідчили потребу педагогів у гнучких індивідуальних траєкторіях, розвитку цифрових компетентностей, використанні відкритих освітніх ресурсів та залученні до професійних спільнот.

Дослідник S. Веїровіч узагальнює наявні підходи та окреслює перспективи розвитку систем оцінювання цифрової компетентності вчителів і доводить, що професійний розвиток педагогів має базуватися на структурованих моделях, які дають змогу оцінити рівень цифрової готовності, визначити потреби в навчанні та забезпечити неперервний розвиток цифрових умінь, обґрунтовує важливість інтеграції цифрових інструментів, системної підтримки педагогів та наявності інституційних механізмів, що забезпечують ефективну реалізацію цифрової трансформації [11].

Модель SAMR ґрунтується на ідеї поступового ускладнення та поглиблення цифрової інтеграції. На початкових рівнях (S і A) цифрові інструменти замінюють або поліпшують традиційні форми роботи, тоді як на інших рівнях (M і R) – трансформують зміст і структуру навчання, створюючи принципово нові освітні можливості, що узгоджується з конструктивістськими підходами, які засвідчують роль активної діяльності й взаємодії в процесі навчання. Модель є важливою складовою цифрової трансформації освіти, оскільки дозволяє педагогам усвідомлено оцінювати власні цифрові практики та планувати їх розвиток. SAMR забезпечує: поетапність цифровізації, що сприяє зменшенню бар'єрів і підвищенню готовності педагогів до інновацій; зв'язок технологічних рішень з педагогічною цінністю, а не лише з технічними можливостями; побудову траєкторій цифрової компетентності педагогів, що відповідає сучасним рамкам DigCompEdu; оптимізацію та трансформацію навчальних процесів шляхом переходу від цифрових аналогів традиційних методів до створення нових форм навчальної діяльності.

Модель TRACK (Technology–Resources–Activities–Collaboration–Knowledge) є сучасною концептуальною рамкою, що описує умови ефективної інтеграції цифрових технологій у навчання та професійний розвиток педагогів. Її застосування дозволяє системно оцінити готовність педагогів і закладів освіти до цифрової трансформації та спроектувати оптимальні освітні траєкторії, орієнтовані на розвиток цифрової, педагогічної та дослідницької компетентностей, поєднуючи компоненти: технологічний (здатність працювати з цифровими платформами та інструментами); ресурсний (доступ до інфраструктури та цифрових сервісів); діяльнісний (здатність застосовувати цифрові технології у навчальних активностях); колаборативний (взаємодія у професійних спільнотах); когнітивний (формування знань, мислення та компетентностей у цифровому середовищі). Модель передбачає, що цифрова трансформація відбувається тоді, коли всі ці компоненти працю-

ють узгоджено, підтримуючи розвиток професійних практик педагогів [3].

У контексті природничо-математичної галузі побудова моделі цифрової трансформації післядипломної природничо-математичної освіти з інтеграцією TRACK дає змогу:

- визначити рівень готовності вчителів до роботи з лабораторними цифровими інструментами;
- розробити індивідуальні траєкторії професійного розвитку;
- інтегрувати STEM-, STEAM- і ШІ-підходи у післядипломну освіту;
- побудувати цифрове середовище для розвитку дослідницької компетентності;
- забезпечити міждисциплінарну співпрацю між педагогами та науковцями;
- формувати педагогічне лідерство у впровадженні цифрових інновацій.

Модель TRACK стає методологічним інструментом для оцінювання, планування та реалізації цифрової трансформації післядипломної природничо-математичної педагогічної освіти на рівні індивідуальних педагогів, освітніх програм і навчальних інституцій.

Цифрова трансформація сприяє якісному розвитку навчання впродовж життя шляхом модернізації інституційних процесів і розширення доступності освіти для дорослих. Узагальнення наукових позицій дає можливість сформувати структурно-функціональну модель цифрової трансформації природничо-математичної післядипломної педагогічної освіти (рис. 1). До її основних компонентів належать:

Методологічний блок: андрагогічний, компетентнісний, системно-діяльнісний, особистісно-орієнтований підходи, підходи на основі штучного інтелекту та подолання бар'єрів; принципи відкритості, гнучкості, персоналізації, неперервності навчання, гуманістичності та етичності застосування ШІ.

Структурно-рівневий блок: стратегічний, організаційно-управлінський, технологічний, педагогічний і соціально-гуманітарний рівні; функціональні блоки – аналітичний, адаптивний, моделювальний, інтеграційний, компетентнісний та оцінювальний.

Суб'єктна складова моделі охоплює вчителів природничо-математичних дисциплін як ключових співтворців цифрової екосистеми, викладачів післядипломної освіти, тьюторів, менторів і тренерів, які забезпечують супровід індивідуальних освітніх траєкторій, керівників та адміністраторів, що задають стратегічні орієнтири цифровізації, IT-фахівців і служби

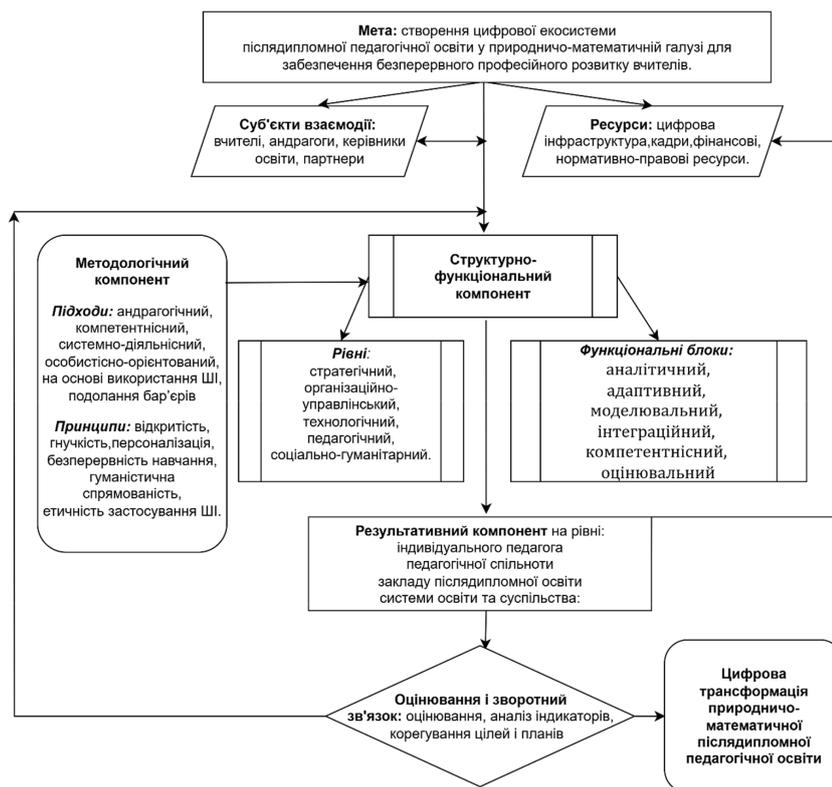


Рис. 1. Авторська модель цифрової трансформації природничо-математичної післядипломної педагогічної освіти

Fig. 1. Author's model of digital transformation of natural sciences and mathematics postgraduate pedagogical education

технічної підтримки, а також представників міжнародних та громадських організацій, що сприяють обміну досвідом і реалізації грантових програм.

Ресурсний компонент моделі охоплює цифрову інфраструктуру, кадровий потенціал, фінансові ресурси й нормативно-правове забезпечення, які створюють передумови для сталої реалізації цифрової трансформації.

Результативний блок – розвиток цифрових компетентностей педагогів, формування професійних спільнот 5.0, зростання академічної мобільності, створення гнучкої цифрової екосистеми управління післядипломною освітою, інтеграція адаптивних та аналітичних систем оцінювання, підвищення якості викладання природничо-математичних дисциплін відповідно до потреб суспільства 5.0.

Оцінювально-коригувальний блок передбачає аналіз кількісних, якісних і компетентнісних індикаторів (освітній прогрес, задоволеність, вплив на професійну практику) та коригування цілей і програм на основі отриманих даних. Це забезпечує адаптивність і неперервне вдосконалення цифрової екосистеми післядипломної освіти.

Модель ґрунтується на засадах цифрової педагогіки та андрагогіки, компетентнісного,

системно-діяльнісного, особистісно орієнтованого підходів, а також підходів на основі використання ШІ та подолання бар'єрів цифровізації. Модель має забезпечити цілісну цифрову трансформацію системи підвищення кваліфікації вчителів природничої та математичної галузей, що відповідає викликам Освіти 5.0 та умовам воєнного часу й післявоєнного відновлення.

Очікувані основні результати впровадження моделі:

- гнучка цифрова екосистема післядипломної педагогічної освіти;
- персоналізовані траєкторії професійного розвитку педагогів;
- синергія технологій ШІ та гуманістичних і етичних цінностей;
- організація, управління, реалізація неперервного професійного розвитку вчителів природничо-математичної освіти з використанням цифрового інформаційно-освітнього середовища;
- формування цифрової компетентності, розвиток критичного, алгоритмічного й STEM-орієнтованого мислення педагогів природничо-математичного профілю;
- підвищення якості викладання STEM-дисциплін на основі використання цифрових ресурсів;

- створення спільнот педагогів Освіти 5.0 для обміну досвідом з використання цифрових інструментів природничої і математичної галузей.

Модель реалізується на різних рівнях.

Стратегічний рівень моделі визначає цілі, пріоритети та політику цифрової трансформації природничо-математичної післядипломної освіти. На цьому рівні відбувається інтеграція національних та міжнародних стандартів, формуються орієнтири розвитку цифрової інфраструктури, інформаційно-освітнього середовища, системи неперервного професійного розвитку педагогів, окреслюються вимоги до цифрової, ШІ та професійної компетентності в реалізації STEM для вчителів.

Організаційно-управлінський рівень відповідає за планування, координацію та управління трансформаційними процесами: розробляється нормативно-правове забезпечення впровадження ШІ, VR/AR та аналітики даних, створюються системи управління цифровою інфраструктурою, механізми моніторингу та оцінювання ефективності змін, здійснюється підготовка керівних і методичних кадрів до роботи в умовах цифрової екосистеми, що забезпечує пов'язаність стратегічних рішень із практикою організації післядипломної педагогічної освіти.

Технологічний рівень є інфраструктурною й інструментальною основою моделі. Він охоплює розгортання SMART-середовища для післядипломної освіти: цифрових платформ управління навчанням, хмарних сервісів для колаборації й зберігання даних, систем штучного інтелекту для персоналізації навчання, VR/AR-середовищ для моделювання педагогічних ситуацій, інструментів Big Data та Learning аналітики, а також засобів кібербезпеки та захисту персональних даних. Педагогічний рівень моделі визначає методичні засади підготовки педагогів у цифровому середовищі: інтеграцію ШІ, VR/AR, аналітики освітніх даних у зміст програм підвищення кваліфікації, цілеспрямований розвиток цифрової, ШІ та професійних компетентностей, впровадження персоналізованих траєкторій навчання, формування дослідницького й критичного мислення, цифрової культури вчителя природничо-математичних дисциплін.

Соціально-гуманітарний рівень забезпечує людиноцентричний характер цифрової трансформації та інтеграцію технологічних інновацій з гуманістичними цінностями, спрямований на формування цифрової етики, культури відповідального використання ШІ, забезпечення інклюзивності цифрового середовища, психолого-педагогічної підтримки педагогів

у процесі цифрової трансформації, розвитку професійних спільнот Освіти 5.0, що поєднують технологічні інновації та цінності співпраці, емпатії й академічної доброчесності.

У межах моделі виокремлено функціональні блоки: аналітичний (збір та інтерпретація освітніх даних для моніторингу й прогнозування), адаптивний (персоналізація навчання за допомогою ШІ-тьюторів і рекомендаційних систем), моделювальний (використання VR/AR-симуляцій для відпрацювання професійних навичок), інтеграційний (цифрова інфраструктура й кіберзахист), компетентнісний (розвиток цифрової, ШІ-компетентностей на основі DigCompEdu) та оцінювальний (формування й автоматизоване оцінювання результатів професійного розвитку з використанням аналітики цифрових слідів та e-portfolio).

Результативний та оцінювально-коригувальний компоненти моделі забезпечують замикання повного циклу цифрової трансформації. Результати виявляються у формуванні цифрових і ШІ-компетентностей педагогів, розвитку STEM-орієнтованого мислення, створенні персоналізованих траєкторій професійного розвитку, розгортанні професійних спільнот Освіти 5.0, підвищенні якості викладання природничо-математичних дисциплін і зменшенні цифрового розриву між педагогами різних регіонів.

Оцінювально-коригувальний компонент передбачає систематичний моніторинг кількісних, якісних і компетентнісних індикаторів, використання формувального та автоматизованого оцінювання на основі ШІ, аналіз результатів для коригування цілей, змісту, програм і ресурсної бази. Це забезпечує адаптивність, гнучкість і неперервне вдосконалення цифрової екосистеми післядипломної природничо-математичної педагогічної освіти.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У дослідженні теоретично обґрунтовано й представлено структурно-функціональну модель цифрової трансформації природничо-математичної післядипломної педагогічної освіти, що поєднує міжнародні стандарти цифрової компетентності DigCompEdu та підходи до впровадження цифрових технологій в освіту SAMR та TRACK, національні нормативи та особливості підготовки педагогів природничої й математичної галузей. Встановлено, що цифрова трансформація післядипломної освіти є ключовою умовою цифрової трансформації професійного розвитку вчителів, оскільки забезпечує інституційні, інфраструктурні, кадрові, методичні та аналітичні засади впровадження сучасних цифрових техно-

логій у педагогічну практику. Запропонована модель охоплює методологічний, структурно-рівневий, суб'єктний, ресурсний, результативний та оцінювально-коригувальний блоки, що забезпечують цілісність цифрової екосистеми післядипломної освіти й орієнтовані на розвиток цифрових, професійних компетентностей педагогів, які реалізують STEM освіту, та упровадження персоналізованих траєкторій навчання, використання інтелектуальних аналітичних систем, VR/AR, мобільних та хмарних сервісів.

Результати дослідження доводять, що ефективність цифрової трансформації професійного розвитку вчителів значною мірою залежить від поєднання цифрової інфраструктури, сучасного інформаційно-освітнього середовища, цифрового лідерства, розвитку андрагогічної компетентності педагогів і готовності освітніх інституцій до інновацій. Здобуті результати дають змогу використовувати модель як основу для модернізації програм підвищення кваліфікації, розроблення політик цифрової трансформації післядипломної освіти, створення галузевих цифрових екосистем та підвищення якості природничо-математичної освіти в умовах воєнних і післявоєнних реалій.

Актуальність дослідження зумовлено необхідністю посилення професійної готовності вчителів природничої та математичної галузей до використання цифрових, інтерактивних, імерсивних та штучно-інтелектуальних технологій у навчанні, а також потребою модернізації системи післядипломної освіти в умовах воєнних викликів, дистанційних форматів, змішаного навчання та переходу до смарт-екосистем освітнього середовища. Результати дослідження засвідчують, що модель спрямовано на забезпечення підвищення якості професійного розвитку педагогів природничої та математичної галузей, сприяння розвитку цифрової та професійної компетентностей, модернізацію післядипломної освіти в умовах воєнних і післявоєнних викликів. Модель має практичне значення для проектування програм підвищення кваліфікації, вдосконалення інформаційно-освітнього середовища післядипломної освіти та формування політик цифрової транс-

сформації освіти, а також для проектування освітньої політики закладів післядипломної освіти, програм підвищення кваліфікації, модернізації інформаційно-освітнього середовища післядипломної освіти, формування політик цифрової трансформації та забезпечення якості природничо-математичної освіти в умовах сучасних технологічних змін і воєнного стану. Модель цифрової трансформації післядипломної природничо-математичної освіти гарантує узгодженість між інституційним рівнем (політики, стандарти, регламенти), інфраструктурним забезпеченням (LMS, хмарні сервіси, цифрові лабораторії), змістово-методичним наповненням (STEM, ШІ, аналітика, VR/AR), організаційними механізмами (змішане та дистанційне навчання, цифрове тьюторство), а також діяльним рівнем (формування цифрової компетентності педагогів, цифрової, STEM- та ШІ-готовності). Така модель не лише визначає архітектуру цифрових змін, а й описує їх логіку: від цифрової трансформації післядипломної освіти як системи до цифрової трансформації професійного розвитку як результату її реалізації.

Визначення результатів і педагогічних умов ефективного впровадження моделі (розвиток цифрової культури педагогів, андрагогів та управлінців, наявність інфраструктури, цифрове лідерство, персоніфікація професійного розвитку, підтримка інноваційної діяльності та формування професійних і цифрових компетентностей учителів природничої та математичної галузей) дають змогу окреслити стратегії і напрями заповнення розробленої моделі.

Перспективами подальших досліджень є поглиблення теоретичного і методичного обґрунтування моделі цифрової трансформації природничо-математичної післядипломної освіти, її апробації в умовах реальних освітніх систем та розроблення і валідація інструментарію оцінювання рівня цифрової компетентності педагогів, визначення показників ефективності цифрової трансформації професійного розвитку, а також аналіз впливу впровадження моделі на якість підвищення кваліфікації та професійних результатів учителів природничої і математичної галузей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Актуальні питання природничо-математичної освіти: зб. наук. праць. Суми: СумДПУ імені А. С. Макаренка, 2022. Режим доступу: https://library.sspu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/02/aktualni-putannya-pryr.-mat.osvity_119_2022.pdf [in Ukrainian].
2. Баніт О. В., Коваленко О. Г. Методика проведення тренінгів з розвитку професійної компетентності андрагогів: методичні рекомендації. Київ: ІПОД імені Івана Зязюна НАПН України, 2022. 104 с. Режим доступу: <https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/731170/> [in Ukrainian].

3. Биков В. Ю. Цифрова трансформація суспільства і розвиток комп'ютерно-технологічної платформи освіти і науки України. Національний авіаційний університет, 2021. Режим доступу: <https://dspace.nau.edu.ua/handle/NAU/44333> [in Ukrainian].
4. Биков В. Ю., Спірін О. М., Пінчук О. А. Сучасні завдання цифрової трансформації освіти. Вісник кафедри ЮНЕСКО «Неперервна професійна освіта XXI століття». 2020. № 1. С. 27–36. DOI: [https://doi.org/10.35387/ucj.1\(1\).2020.27-36](https://doi.org/10.35387/ucj.1(1).2020.27-36). [in Ukrainian].
5. Биков В. Ю., Яцишин А. В. (ред.). Цифрова трансформація освіти і науки: теорія і практика. Київ: ФОП Ямчинський О. В., 2019. 386 с. [in Ukrainian].
6. Бондаренко Т. С. Інтелектуальні інформаційні технології як складник цифрової трансформації освіти. Державна науково-педагогічна бібліотека України імені В. О. Сухомлинського, 2024. Режим доступу: https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/741212/1/Bondarenko_TS_ar_AN_19_2024.pdf [in Ukrainian].
7. Валько Н. В. Система підготовки майбутніх учителів природничо-математичних дисциплін до застосування STEM технологій у професійній діяльності: дис. ... д-ра пед. наук: 13.00.04 / Херсонський держ. ун-т, Класичний приватний ун-т. Запоріжжя, 2020. 462 с. Режим доступу: http://virtuni.education.zr.ua/info_cru/sites/default/files/!Валько_дис.pdf [in Ukrainian].
8. Годлевська К. В., Котун К. В., Постригач Н. О., Старощук Ю. М. Професійна підготовка вчителів старшої школи у зарубіжних країнах : навчальний посібник для дистанційного курсу. Київ: ІПОД імені Івана Зязюна НАПН України, 2022. 190 с. Режим доступу: <https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/734014/> [in Ukrainian].
9. Кремень В. Г., Биков В. Ю., Ляшенко О. І., Литвинова С. Г., Лугова В. І., Малований Ю. І., Пінчук О. П., Топузов О. М. Науково-методичне забезпечення цифровізації освіти в Україні: стан, проблеми, перспективи. *Вісник Національної академії педагогічних наук України*. 2022. Т. 4, № 2. С. 1–49. DOI: <https://doi.org/10.37472/v.naes.2022.4223> [in Ukrainian].
10. Alshammari A. F. Digital Transformation Model to Improve Educational Processes in Higher Education Applying Big Data. 2023 International Conference on Smart Computing and Application (ICSCA). 2023. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSCA57840.2023.10087660>.
11. Bećirović S. Fostering digital competence in teachers: A review of existing frameworks. *Springer Briefs in Education*. 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-0444-0_5. URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/85174986223>
12. Bethencourt-Aguilar, A., Area-Moreira, M., Sosa-Alonso, J. J., Castellano-Nieves, D. The digital transformation of postgraduate degrees: A study on academic analytics at the University of La Laguna. 2021 XI International Conference on Virtual Campus (JICV). IEEE, 2021. P.1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/JICV53222.2021.9600311>.
13. Bisri A., Nurtantyana R., Prasetyadi A., Putri A., Koesoema A. P., Rosmansyah Y. The Development of A Digital Transformation Model for Higher Education Using the Object-Process Methodology. 2024 International Conference on Computer, Control, Informatics and its Applications (IC3INA). 2024. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/IC3INA64086.2024.10732551>.
14. Darling-Hammond L., Hyler M. E., Gardner M. Effective Teacher Professional Development [Electronic resource]. Learning Policy Institute. 2017. URL: <https://learningpolicyinstitute.org/product/effective-teacher-professional-development-report> (дата звернення: 26.07.2025).
15. Joseph O. B., Onwuzulike O. C., Shitu K. Digital transformation in education: Strategies for effective implementation [Electronic resource]. *World J Advanced Res & Rev*. 2024. Vol. 23(02). DOI: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.23.2.2668>.
16. Liu B. An Assessment of Teaching Models and Strategic Recommendations Under the Background of Digital Transformation. *Research and Advances in Education*. 2023. № 11. DOI: <https://doi.org/10.56397/rae.2023.11.03>.
17. Liu M., Su R. Research on the Path of Digital Transformation of Postgraduate Education in Chinese Universities under the Background of Digital Education Strategy. *Intelligent Information Management*. 2023. Vol. 15, No. 5. P. 339–349. DOI: <https://doi.org/10.4236/iim.2023.155016>.
18. Liu, M. Exploration of Digital Transformation Schema for Professional Degree Postgraduate Training. *Journal of Software Engineering and Applications*. 2023. Vol. 16. No. 12. P. 819–830. DOI: <https://doi.org/10.4236/jsea.2023.1612035>.
19. Ly B. The Interplay of Digital Transformational Leadership, Organizational Agility, and Digital Transformation. *Journal of the Knowledge Economy*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13132-023-01377-8>.
20. Mukul E., Büyükközkcan G. Digital transformation in education: A systematic review of education 4.0 [Electronic resource]. *Technological Forecasting and Social Change*. 2023. Vol. 194, 122664. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122664>.
21. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). Education at a glance 2022: OECD indicators [Electronic resource]. OECD. Paris: OECD Publishing, 2022. 510 p. URL: https://www.oecd.org/en/publications/education-at-a-glance-2024_c00cad36-en.html / (viewed: 14.08.2025). Title from screen.

22. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). OECD handbook for internationally comparative education statistics: concepts, standards, definitions and classifications [Electronic resource] / OECD. Paris: OECD Publishing, 2017. URL: https://www.oecd.org/en/publications/oecd-handbook-for-internationally-comparative-education-statistics_9789264279889-en.html (viewed: 14.08.2025). Title from screen.
23. Ovcharuk O. V., Gurzhiy A. M., Ivaniuk I. V., Kartashova L. A., Hrytsenchuk O. O., Vakaliuk T. A., Shyshkina M. P. The use of digital tools by secondary school teachers for the implementation of distance learning in the context of digital transformation in Ukraine. *CTE Workshop Proceedings*. 2022. Vol. 9. P. 16–27. DOI: <https://doi.org/10.55056/cte.96>.
24. Phuong T. T. T., Nguyen T.-T., Danh N. N., Ngo Van D., Luong H. D., Nguyen L. V. A., Tran T. Digital transformation in education: a bibliometric analysis using Scopus. *European Science Editing*. 2023. Vol. 49. e107138. DOI: <https://doi.org/10.3897/ese.2023.e107138>.
25. Redecker C. European Framework for the Digital Competence of Educators: DigCompEdu. – Luxembourg: Publications Office of the EU, 2017. 92 c. URL: <https://ec.europa.eu/jrc/en/digcompedu>
26. Siemens G. Connectivism: A Learning Theory for the Digital Age [Electronic resource]. 2005. URL: https://www.itdl.org/Journal/Jan_05/article01.htm
27. Vorotnykova I. Professional development of teachers in conditions of digital transformation of postgraduate pedagogical education. *Proceedings of the 3rd Workshop on Digital Transformation of Education (DigiTransfEd 2024) co-located with 19th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications*. 2024. C. 36–46. ISSN 1613-0073. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3771> (viewed: 08.08.2025).
28. Vorotnykova I., Morze N., Hrynevych L. Digital transformation of secondary education of Ukraine and the quality of teaching natural and mathematical sciences in the conditions of war. *CEUR Workshop Proceedings*. 2023. Vol. 3553. P. 57–74. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3553/paper5.pdf>
29. Zarifis A., Efthymiou L. The four business models for AI adoption in education: Giving leaders a destination for the digital transformation journey. 2022 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON). 2022. P. 1868–1872. DOI: <https://doi.org/10.1109/EDUCON52537.2022.9766687>
30. Zulfiani Z., Suwarna I. P., El Islami R. A., Sari I. J. Trends in SAMR research in teaching and learning from 2019 to 2024: A systematic review. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.21833/ijaas.2025.04.012>. <https://www.scopus.com/pages/publications/105007869124>

*Автор заявляє, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає.
В роботі не використано ресурс штучного інтелекту*

Отримано: 30.08.2025

Переглянуто: 04.10.2025

Прийнято: 20.10.2025

Опубліковано: 30.11.2025

Vorotnykova Iryna

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Science and Mathematics Education and Technologies

i.vorotnykova@kubg.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1211-8885>

Institute In Service Teacher's Training Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University

P. Tychyny Avenue 22 a, Kyiv, Ukraine, 02152

MODEL OF DIGITAL TRANSFORMATION OF NATURAL AND MATHEMATICAL POSTGRADUATE TEACHER EDUCATION

The article is devoted to constructing and analysing the potential for implementing a model of digital transformation of professional development for natural science and mathematics teachers, based on the analysis of existing digital transformation models and methodologies for integrating digital technologies into education, as well as examining key strategies and directions for the digital transformation of natural and mathematical postgraduate teacher education as a prerequisite for the digital transformation of teachers' professional development.

The study employed theoretical research methods, including analysis, synthesis, comparison, generalisation, and modelling. The analysis of scientific studies and publications on digital transformation in education, together with the experience of professional development for natural science and mathematics teachers in postgraduate education, made it possible to theoretically substantiate a model of

digital transformation of teachers' professional development aligned with international frameworks such as DigCompEdu and technology integration models including SAMR and TPACK. The model is grounded in contemporary approaches to educational digitalisation, the requirements of the professional teacher standard, and international models of digital technology implementation

The proposed structural-functional model of digital transformation integrates normative, organisational, resource-based, subject-related, procedural, and outcome-oriented components. It is developed with consideration of systemic, competence-based, activity-based, andragogical, and AI-oriented approaches, reflecting the logic of digital transformation of postgraduate education as a holistic educational process. The model is implemented at four levels: strategic, organisational-managerial, technological, and socio-humanitarian. Functionally, it ensures normative alignment, organisation of the digital educational process, updating the content of professional development, the introduction of innovative digital technologies, and analytics of educational outcomes.

The resultative component is determined at the individual level (teacher), the level of the professional community, the postgraduate education institution, and at the overall system level. It serves as a foundation for the development of teachers' digital competence, the strengthening of their professional autonomy, and the modernisation of postgraduate education. Key mechanisms for the model's implementation and pedagogical conditions for its effective introduction are identified.

Keywords: digital transformation; postgraduate teacher education; natural and mathematical education; in-service training; professional development.

REFERENCES

1. Aktualni pytannia pryrodnycho-matematychnoi osvity: Collection of scientific works. (2022). Sumy State Pedagogical University named after A. S. Makarenko. URL: https://library.sspu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/02/aktualni-pytannya-pryr-mat.osvity_119_2022.pdf
2. Banit, O. V., & Kovalenko, O. H. (2022). *Methodology for conducting trainings on developing andragogues' professional competence: Methodological recommendations*. Ivan Ziaziun Institute of Pedagogical and Adult Education of the NAES of Ukraine. URL: <https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/731170/>
3. Bykov, V. Yu. (2021). *Digital transformation of society and the development of the computer-technological platform of education and science of Ukraine*. URL: <https://dspace.nau.edu.ua/handle/NAU/44333>
4. Bykov, V. Yu., Spirin, O. M., & Pinchuk, O. A. (2020). Current tasks of digital transformation of education. *UNESCO Chair «Lifelong Professional Education of the 21st Century». Bulletin, 1*, 27-36. DOI: [https://doi.org/10.35387/ucj.1\(1\).2020.27-36](https://doi.org/10.35387/ucj.1(1).2020.27-36)
5. Bykov, V. Yu., & Yatsyshyn, A. V. (Eds.). (2019). *Digital transformation of education and science: Theory and practice* [in Ukrainian]. FOP Yamchynskiy O. V.
6. Bondarenko, T. S. (2024). *Intelligent information technologies as a component of digital transformation of education*. State Scientific-Pedagogical Library of Ukraine. URL: https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/741212/1/Bondarenko_TS_ar_AH_19_2024.pdf
7. Valko, N. V. (2020). *A system for preparing future teachers of natural and mathematical disciplines for the use of STEM technologies in professional activity* (Doctoral dissertation). URL: http://virtuni.education.zp.ua/info_cpu/sites/default/files/!Валько_дис.pdf
8. Hodlevska, K. V., Kotun, K. V., Postryhach, N. O., & Staroshchuk, Yu. M. (2022). *Professional training of high school teachers in foreign countries: Textbook for a distance course*. Ivan Ziaziun Institute of Pedagogical and Adult Education of the NAES of Ukraine. URL: <https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/734014/>
9. Kremen, V. H., Bykov, V. Yu., Lyashenko, O. I., Lytvynova, S. G., Luhovyi, V. I., Malovanyi, Yu. I., Pinchuk, O. P., & Topuzov, O. M. (2022). Scientific and methodological support for the digitalization of education in Ukraine: State, problems, prospects. *Journal of the National Academy of Educational Sciences of Ukraine, 4*(2), 1-49. DOI: <https://doi.org/10.37472/v.naes.2022.4223>
10. Alshammari, A. F. (2023). Digital transformation model to improve educational processes in higher education applying big data. *2023 International Conference on Smart Computing and Application (ICSCA)*, 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSCA57840.2023.10087660>
11. Bećirović, S. (2023). Fostering digital competence in teachers: A review of existing frameworks. *Springer Briefs in Education*. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-0444-0_5
12. Bethencourt-Aguilar, A., Area-Moreira, M., Sosa-Alonso, J. J., & Castellano-Nieves, D. (2021). The digital transformation of postgraduate degrees: A study on academic analytics at the University of La Laguna. *2021 XI International Conference on Virtual Campus (JICV)*, 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/JICV53222.2021.9600311>
13. Bisri, A., Nurtantyana, R., Prasetyadi, A., Putri, A., Koesoema, A. P., & Rosmansyah, Y. (2024). The development of a digital transformation model for higher education using the object-process methodology. *2024 International Conference on Computer, Control, Informatics and its Applications (IC3INA)*, 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/IC3INA64086.2024.10732551>

14. Darling-Hammond, L., Hyler, M. E., & Gardner, M. (2017). *Effective teacher professional development*. Learning Policy Institute. URL: <https://learningpolicyinstitute.org/product/effective-teacher-professional-development-report>
15. Joseph, O. B., Onwuzulike, O. C., & Shitu, K. (2024). Digital transformation in education: Strategies for effective implementation. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 23(2). DOI: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.23.2.2668>
16. Liu, B. (2023). An assessment of teaching models and strategic recommendations under the background of digital transformation. *Research and Advances in Education*, 11. DOI: <https://doi.org/10.56397/rae.2023.11.03>
17. Liu, M., & Su, R. (2023). Research on the path of digital transformation of postgraduate education in Chinese universities under the background of digital education strategy. *Intelligent Information Management*, 15(5), 339-349. DOI: <https://doi.org/10.4236/iim.2023.155016>
18. Liu, M. (2023). Exploration of digital transformation schema for professional degree postgraduate training. *Journal of Software Engineering and Applications*, 16(12), 819-830. DOI: <https://doi.org/10.4236/jsea.2023.1612035>
19. Ly, B. (2023). The interplay of digital transformational leadership, organizational agility, and digital transformation. *Journal of the Knowledge Economy*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13132-023-01377-8>
20. Mukul, E., & Büyükközkın, G. (2023). Digital transformation in education: A systematic review of Education 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, 194, 122664. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122664>
21. Organisation for Economic Co-operation and Development. (2022). *Education at a glance 2022: OECD indicators*. OECD Publishing. URL: https://www.oecd.org/en/publications/education-at-a-glance-2024_c00cad36-en.html
22. Organisation for Economic Co-operation and Development. (2017). *OECD handbook for internationally comparative education statistics: Concepts, standards, definitions and classifications*. OECD Publishing. URL: https://www.oecd.org/en/publications/oecd-handbook-for-internationally-comparative-education-statistics_9789264279889-en.html
23. Ovcharuk, O. V., Gurzhii, A. M., Ivaniuk, I. V., Kartashova, L. A., Hrytsenchuk, O. O., Vakaliuk, T. A., & Shyshkina, M. P. (2022). The use of digital tools by secondary school teachers for the implementation of distance learning in the context of digital transformation in Ukraine. *CTE Workshop Proceedings*, 9, 16-27. DOI: <https://doi.org/10.55056/cte.96>
24. Phuong, T. T. T., Nguyen, T.-T., Danh, N. N., Ngo Van, D., Luong, H. D., Nguyen, L. V. A., & Tran, T. (2023). Digital transformation in education: A bibliometric analysis using Scopus. *European Science Editing*, 49, e107138. DOI: <https://doi.org/10.3897/ese.2023.e107138>
25. Redecker, C. (2017). *European framework for the digital competence of educators: DigCompEdu*. Publications Office of the EU. URL: <https://ec.europa.eu/jrc/en/digcompedu>
26. Siemens, G. (2005). Connectivism: A learning theory for the digital age. URL: https://www.itdl.org/Journal/Jan_05/article01.htm
27. Vorotnykova, I. (2024). Professional development of teachers in conditions of digital transformation of postgraduate pedagogical education. *Proceedings of the 3rd Workshop on Digital Transformation of Education*, 36-46. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3771>
28. Vorotnykova, I., Morze, N., & Hrynevych, L. (2023). Digital transformation of secondary education of Ukraine and the quality of teaching natural and mathematical sciences in the conditions of war. *CEUR Workshop Proceedings*, 3553, 57-74. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3553/paper5.pdf>
29. Zarifis, A., & Efthymiou, L. (2022). The four business models for AI adoption in education: Giving leaders a destination for the digital transformation journey. *2022 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, 1868-1872. DOI: <https://doi.org/10.1109/EDUCON52537.2022.9766687>
30. Zulfiani, Z., Suwarna, I. P., El Islami, R. A., & Sari, I. J. (2025). Trends in SAMR research in teaching and learning from 2019 to 2024: A systematic review. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*. DOI: <https://doi.org/10.21833/ijaas.2025.04.012>

*The author declares no conflict of interest regarding the publication of this manuscript.
The work does not use artificial intelligence resources.*

Submission received: 30.08.2025

Revised: 04.10.2025

Accepted: 20.10.2025

Published: 30.11.2025