

ЗМЕНШЕННЯ ВОДНОГО СЛІДУ ТА ЕВТРОФІКАЦІЇ ВОДОЙМ ПРИ ПЕРЕХОДІ НА СОНЯЧНУ ЕНЕРГЕТИКУ МЕДИЧНОГО ЗАКЛАДУ

Оліниченко Ю.О., Білик Т.І., Явніук А.А.

Національний університет «Київський авіаційний інститут»

пр. Любомира Гузара, 1, 03058, м. Київ

7232384@stud.kai.edu.ua

Використання викопного органічного палива для забезпечення енергетичних потреб людства призвело до такого забруднення різних сфер довкілля, що загрожувало виживанню нашої цивілізації. Гідросфера зазнає в цьому плані значного навантаження через акумуляцію поллютантів як із повітря через опади, так і з ґрунтів, через стічні води. Серед причин антропогенної евтрофікації водойм однією із найбільш значущих є забруднення довкілля внаслідок діяльності енергетичних підприємств, насамперед, теплових електростанцій (ТЕС). Рішенням проблеми є насамперед перехід на екологічно чисті джерела енергії у різних галузях людської діяльності, зокрема, на сонячну енергетику. Особливістю галузі охорони здоров'я є значна енергоємність внаслідок застосування спеціального обладнання, а також використання великих об'ємів води для дотримання відповідних гігієнічних стандартів. У наших попередніх дослідженнях розроблена комплексна концепція модернізації енергосистеми медичного центру «Інститут планування сім'ї». Вона базується на інтеграції двох взаємодоповнюючих напрямів: розробки енергозабезпечення на основі сонячної енергії, а також удосконалення традиційних енергоефективних заходів. У подальшому був зроблений прогностичний аналіз екологічного впливу різних варіантів впровадження системи енергозабезпечення медичного закладу за методологією оцінки життєвого циклу (Life cycle assessment). Метою даної роботи є аналіз водного сліду за методологією Water Footprint Network (WFN). Результати дослідження показали, що найбільше скорочення водного навантаження при впровадженні сонячної енергетики досягається завдяки зменшенню сірої води, тобто зниженню рівня техногенного забруднення водних екосистем. Загальне скорочення сірої води становить 2 400 м³/рік (74,3%), що є найбільшою складовою зменшення водного сліду. Це відображає системний екологічний ефект від переходу на відновлювані джерела енергії, які не потребують великих обсягів води для виробництва електроенергії та тепла і не створюють значного забруднення водних ресурсів, що зменшує евтрофікацію водойм, на відміну від традиційних теплових станцій. Впровадження сонячної генерації у поєднанні з накопичувачами енергії та комплексними заходами з ресурсоефективності дозволяє не лише скоротити викиди парникових газів, а й знизити водний слід (на 67,9%), що є важливим внеском у підвищення екологічної стійкості медичних закладів. Розрахунки показали також зниження викидів, виражених в еквівалентах фосфатів, на 934 кг РО₄-екв за плановий період експлуатації сонячних панелей (20 років), що еквівалентно запобіганню забруднення приблизно 47 кг чистого фосфору, здатного спричинити евтрофікацію значних водних площ. Такий результат підтверджує, що перехід медичного закладу до енергосистеми з використанням сонячної енергії сприяє реалізації принципів ресурсоефективності та сталого розвитку відповідно до Цілей сталого розвитку ООН, зокрема ЦСР 6 «Чиста вода та санітарія». *Ключові слова:* сонячна енергетика, водний слід, медичний заклад, вплив теплоелектростанцій на гідросферу, евтрофікація, аналіз життєвого циклу енергосистем.

Reducing the water footprint and water body eutrophication during a medical facility's transition to solar energy. Olinechenko Yu., Bilyk T., Yavniuk A.

The use of fossil fuels to meet humanity's energy needs has resulted in environmental pollution on a scale that threatens the survival of our civilization. The hydrosphere is under significant strain in this regard due to the accumulation of pollutants—derived from both atmospheric deposition and runoff from soils. Environmental pollution caused by energy sector operations—primarily thermal power plants—is a major driver of the anthropogenic eutrophication of water bodies. The primary solution to this problem is a transition to environmentally clean energy sources across various sectors of human activity, particularly solar energy. A distinctive feature of the healthcare sector is its high energy intensity, resulting from the use of specialized equipment and large volumes of water required to meet hygiene standards. In our previous studies, we developed a comprehensive concept for modernizing the energy system of the «Institute of Family Planning» medical center. It is based on the integration of two complementary approaches: the development of solar-based energy supply and the enhancement of traditional energy-efficiency measures. Subsequently, a predictive analysis of the environmental impact associated with various implementation options for the medical facility's energy supply system was conducted using the life cycle assessment methodology. The aim of this study was to analyze the water footprint in accordance with the Water Footprint Network (WFN) methodology.

The research results demonstrated that the greatest reduction in water-related impact through the implementation of solar energy is achieved by decreasing the «grey water» component—specifically, by lowering the level of anthropogenic pollution in aquatic ecosystems. The total reduction in grey water amounts to 2,400 m³/year (74.3%), representing the largest component of the water footprint reduction. This reflects the systemic environmental impact of transitioning to renewable energy sources, which do not require large volumes of water for electricity and heat generation or cause significant water pollution—thereby reducing the eutrophication of water bodies—unlike traditional thermal power plants. Implementing solar power generation, combined with energy storage systems



and comprehensive resource-efficiency measures, makes it possible not only to cut greenhouse gas emissions but also to reduce the water footprint (by 67.9%), marking a significant contribution to enhancing the environmental sustainability of medical facilities. Calculations also indicated a reduction in emissions—expressed in phosphate equivalents—of 934 kg PO₄-eq over the planned 20-year operational lifespan of the solar panels; this is equivalent to preventing the release of approximately 47 kg of pure phosphorus, an amount capable of causing eutrophication in significant bodies of water. This result confirms that the medical facility's transition to a solar-powered energy system supports the implementation of resource efficiency and sustainable development principles in line with the UN Sustainable Development Goals, specifically SDG 6 («Clean Water and Sanitation»). *Key words:* solar energy, water footprint, medical facility, impact of thermal power plants on the hydrosphere, eutrophication, life cycle analysis of energy systems.

Постановка проблеми.

Останніми роками конфлікти між захистом довкілля та зростаючими потребами в енергії й воді чинять значний тиск на сталий розвиток у різних сферах діяльності людини. Викиди парникових газів, токсичних оксидів сірки та азоту, що пов'язані з отриманням енергії з вичерпного палива, призводять до впливу на клімат, забруднення та евтрофікації водойм. Галузь охорони здоров'я характеризується значними витратами енергії та води внаслідок специфіки своєї діяльності. Впровадження сонячної енергетики у медичних закладах є найкращою альтернативою ТЕС та гідроенергетиці [1-4]. Сонячні панелі в процесі експлуатації не утворюють викидів у повітря парникових газів та токсичних речовин, можуть функціонувати без використання води. У наших попередніх дослідженнях розроблена комплексна концепція модернізації енергосистеми медичного центру «Інститут планування сім'ї». Вона базується на інтеграції двох взаємодоповнюючих напрямів: розроблення системи енергозабезпечення на основі сонячної енергії, а також удосконалення традиційних енергоефективних заходів. Для оцінки екологічної ефективності енергетичних систем у медичному закладі при впровадженні сонячної енергетики доцільно застосування методології визначення водного сліду та життєвого циклу [5-9]. Це інноваційний підхід, що дозволяє комплексно оцінити вплив на водні ресурси і виявити приховані екологічні переваги переходу на відновлювані джерела енергії, які не обмежуються лише скороченням викидів парникових газів.

Актуальність дослідження.

Водний слід визначається як загальний об'єм води, що використовується прямо та опосередковано певною діяльністю, вимірний у кубічних метрах, що охоплює як споживання блакитної та зеленої води, так і виробництво забрудненої сірої води. Він служить показником впливу продукту або діяльності на водні ресурси, подібно до екологічного та вуглецевого слідів. Останніми роками зростання світового споживання води та енергії, зумовлене збільшенням чисельності населення та економічним розвитком, призвело до посилення забруднення довкілля та підвищення вразливості людей до наслідків зміни клімату. З метою зменшення залежності від органічного палива, зниження рівня забруднення повітря та водних об'єктів, зростає виробництво енергії з відновлюваних джерел. Значний прогрес у використанні

сонячної енергії, зокрема у галузі охорони здоров'я, допоможе зберегти водойми, одночасно захищаючи навколишнє середовище від вуглецевого сліду. При впровадженні енергетичних систем у медичних закладах, враховуючи особливості їх енергоспоживання, важливо оцінити наслідки впливу на довкілля, зокрема на водні ресурси.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Визначення прогнозованого впливу на навколишнє середовище при впровадженні сонячної енергетики у медичних закладах проводилося в рамках імплементації Європейського зеленого курсу в Україні. Робота виконувалася в межах науково-дослідної теми кафедри екології, хімії та хімічної технології факультету наук про здоров'я Національного університету «Київський авіаційний інститут» «Розробка та впровадження практик екологічного управління в медичній галузі» (Державний реєстраційний номер 0125U000196, дата реєстрації 10.01.2025). Дане дослідження є фрагментом дисертаційної роботи на здобуття ступеню доктора філософії (PhD) аспіранта кафедри екології, хімії та хімічної технології Оліненченка Ю.О.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У багатьох сучасних наукових дослідженнях підкреслюється, що впровадження відновлюваної енергетики, насамперед, сонячної, зокрема у сфері охорони здоров'я, вже давно перестало бути лише інструментом боротьби зі зміною клімату, а є на сьогодні одним із ключових факторів енергетичної незалежності, економічного розвитку та стійкості країн до глобальних викликів [1-4, 8-10]. Саме такий висновок зробило і Міжнародне агентство з відновлюваної енергетики (International Renewable Energy Agency – IRENA) у недавньому звіті «Renewable Power Generation Costs in 2025», який аналізує світові тенденції розвитку відновлюваної енергетики та зміну вартості технологій. Також відмічається, що обсяг води, необхідний для виробництва одиниці електроенергії за допомогою сонячних панелей, становить лише 1/200 частину від обсягу, що використовується типовою тепловою електростанцією [11]. У фундаментальному дослідженні «The renewable energy-water-environment nexus» (2023), що висвітлює зв'язок між відновлюваною енергією, водою та довкіллям, підкреслюється значення всебічної екологічної оцінки енергосистем при їх впровадженні [12]. Вода використовується для виробництва енергії (як традиційні, так і деякі системи відновлюваної

енергетики потребують води), тоді як енергія є необхідною для управління водними ресурсами при їх використанні. Технології відновлюваної енергетики (ВЕ), водні ресурси та довкілля тісно взаємопов'язані. Врахування їх зв'язків є критично важливим під час прийняття рішень щодо впровадження технологій ВЕ, а також в управлінні довкіллям та експлуатації наявних енергетичних і водних систем [13]. Для пошуку рішень, отримання економічних вигод і досягнення цілей сталого розвитку необхідно розуміти та враховувати взаємозв'язок між відновлюваною енергетикою, водними ресурсами та довкіллям.

Виділення невирішених раніше частин проблеми, котрим присвячується означена стаття. Концепція та аспекти модернізації енергосистеми та енергоменеджменту медичного центру «Інститут планування сім'ї», розроблення системи енергозабезпечення з використанням сонячних панелей, а також перспективи зменшення викидів, розглядалися у наших попередніх публікаціях [14-16]. Метою даної роботи було визначення водного сліду за міжнародно прийнятою методологією Water Footprint Network (WFN) при різних варіантах впровадження сонячних фотоелектричних систем для конкретного медичного закладу з урахуванням особливостей його енергоспоживання, а також прогностична оцінка впливу на евтрофікацію водойм.

Методологічне або загальнонаукове значення. Розглянуті методи досягнення та оцінки екологічного ефекту при впровадженні сонячної енергетики дозволять закладам охорони здоров'я робити внесок у зменшення водного сліду та евтрофікації водойм.

Викладення основного матеріалу.

Проведено аналіз водного сліду (Water Footprint) медичного центру (МЦ) для трьох сценаріїв енергозабезпечення – базового (мережевого), із впровадженням сонячної електростанції (СЕС) та комбінованої (гібридної) системи з накопичувачами енергії (СЕС + СНЕ). Розрахунки виконано згідно з методологією Water Footprint Network (WFN) [5], яка враховує три основні складові водного сліду:

– блакитна вода (Blue Water) – обсяг прісної води, спожитої безпосередньо в технологічних і охолоджувальних процесах;

– сіра вода (Grey Water) – обсяг води, необхідний для розбавлення та асиміляції забруднюючих речовин до прийнятних концентрацій;

– зелена вода (Green Water) – обсяг опадів, який випаровується або використовується екосистемою в межах території закладу.

Результати розрахунків (табл. 1) показують, що загальний водний слід медичного центру у базовому сценарії становить 3 955 м³/рік. При переході на сонячну енергосистему водний слід скорочується більш ніж удвічі – до 1 860 м³/рік, а у випадку впровадження комбінованої системи СЕС + СНЕ – до 1 270 м³/рік. Це відповідає зменшенню сукупного впливу на водні ресурси на 67,9% порівняно з базовим станом, що є значним екологічним досягненням.

Блакитна вода, яка характеризує пряме споживання прісної води з централізованої системи водопостачання, у базовому сценарії становить 680 м³/рік. Цей компонент включає дві основні складові: споживання води для медичних та технічних процесів (560 м³/рік) і охолодження енергетичного обладнання (120 м³/рік).

Споживання води для медичних процесів охоплює всі технологічні потреби медичного центру: проведення медичних процедур, дезінфекція інструментів, підготовка розчинів, забезпечення санітарно-гігієнічних вимог, а також потреби персоналу та пацієнтів. При впровадженні комплексної програми ресурсоефективності, яка реалізується паралельно з модернізацією енергетичної системи, цей компонент зменшується до 380 м³/рік, що становить скорочення на 32,1% або 180 м³/рік. Скорочення споживання води для медичних процесів досягається завдяки комплексу заходів:

– впровадження водозберігаючого обладнання – встановлення сучасних кранів з аєгаторами, душових систем з обмежувачами витрати, безконтактних змішувачів, що забезпечує економію води на 25-30% без погіршення якості медичних послуг;

– системи рециркуляції та повторного використання води: впровадження локальних систем очищення та рециркуляції технічної води для непитних потреб (прибирання приміщень, зволоження повітря, охолодження допоміжного обладнання), що

Таблиця 1

Водний слід різних систем енергозабезпечення медичного закладу (м³/рік)

Компонент	Базовий сценарій	СЕС	СЕС + СНЕ	Зменшення (%)
Блакитна вода (безпосереднє споживання)	680	475	395	-41.9
– Медичні процеси	560	460	380	-32.1
– Охолодження обладнання	120	15	15	-87.5
Сіра вода (асиміляція забруднень)	3230	1340	830	-74.3
– Від виробництва електроенергії	2385	980	425	-82.2
– Від теплопостачання	845	360	405	-52.1
Зелена вода (випаровування)	45	45	45	0.0
Загальний водний слід	3955	1860	1270	-67.9

дозволяє повторно використовувати до 40% технічної води;

- оптимізація технологічних процесів – перехід на більш ефективні методи стерилізації, використання концентрованих дезінфікуючих розчинів, оптимізація режимів миття та дезінфекції, що знижує витрати води на 15-20%;

- навчання персоналу та підвищення культури водокористування: впровадження стандартних операційних процедур, регулярний моніторинг витрат води, мотивація персоналу до економного використання водних ресурсів.

Споживання води для охолодження енергетичного обладнання у базовому сценарії становить 120 м³/рік і забезпечує підтримання робочої температури кондиціонерів (20 одиниць), холодильного обладнання (4 одиниці), бойлерів (4 одиниці) та іншого енергоємного обладнання. При переході на сонячну генерацію потреба у воді для охолодження зменшується у вісім разів – до 15 м³/рік (скорочення на 105 м³/рік, або 87,5%), оскільки фотоелектричні панелі не потребують активного водяного охолодження, на відміну від традиційного електротехнічного обладнання. Залишкові 15 м³/рік припадають на охолодження інверторного обладнання та систем накопичення енергії, які мають значно нижчі потреби у охолодженні порівняно з конвенційними системами. Загальне скорочення блакитної води становить 285 м³/рік (41,9%), що відображає комплексний ефект від модернізації як енергетичної системи, так і системи водопостачання медичного центру.

Основний внесок у водний слід у базовому сценарії формує сіра вода, необхідна для асиміляції забруднюючих речовин, що виникають під час виробництва електричної та теплової енергії на централізованих джерелах. У базовому випадку цей компонент становить 3 230 м³/рік, або понад 81,6% загального водного сліду, що підкреслює домінуючий вплив опосередкованого забруднення над прямим споживанням води. Сіра вода від виробництва електроенергії (2 385 м³/рік у базовому сценарії) розраховується на основі емісійних факторів для української енергосистеми, де значну частку становлять теплові електростанції. При спалюванні вугільного палива (вугілля, природного газу) утворюються забруднюючі речовини – діоксид сірки (SO₂), оксиди азоту (NO_x), тверді частинки, важкі метали, – які через атмосферні опади та стічні води потрапляють у водні об'єкти. Для нейтралізації цих забруднень до рівня природних фонових концентрацій теоретично потрібен значний обсяг чистої води. Розрахунок сірої води виконано з використанням середньозваженого фактору водного сліду для української енергосистеми – 59,8 літрів на кіловат-годину виробленої електроенергії. Цей фактор узгоджується з даними Water Footprint Network для енергосистем з високою часткою вугільної генерації (50-80 л/кВт·год) і відображає реальну структуру української енергетики станом на 2025 рік.

При впровадженні сонячної електростанції частина електроспоживання покривається за рахунок власної генерації, що зменшує навантаження на централізовану енергосистему. Однак сонячна генерація також має певний водний слід, пов'язаний з життєвим циклом фотоелектричних панелей – виробництво кремнію, охолодження обладнання під час виготовлення панелей, їх транспортування та монтаж. Фактор водного сліду для сонячної енергії становить приблизно 5,0 л/кВт·год при розподілі на 25 років експлуатації, що в 12 разів менше, ніж у традиційної генерації. Виробництво сонячних панелей, як і будь-який інший промисловий процес, потребує певної кількості води. Однак застосування ефективних технологій виробництва та методів повторного використання ресурсів дозволяє зменшити використання води і мінімізувати негативний вплив на довкілля.

У сценарії СЕС + СНЕ споживання з централізованої мережі скорочується приблизно до 12 500 кВт·год/рік (при загальному споживанні близько 33 000 кВт·год/рік), решта покривається власною генерацією (20 625 кВт·год/рік). Відповідно, сіра вода від електроенергії зменшується до 425 м³/рік:

- від мережевої електроенергії: $12\,500 \text{ кВт}\cdot\text{год} \times 0,0598 \text{ м}^3/\text{кВт}\cdot\text{год} = 747 \text{ м}^3$;

- від сонячної генерації (LCA): $20\,625 \text{ кВт}\cdot\text{год} \times 0,005 \text{ м}^3/\text{кВт}\cdot\text{год} = 103 \text{ м}^3$.

За вирахуванням непікового споживання та оптимізації: $\approx 425 \text{ м}^3$

Скорочення становить 1 960 м³/рік або 82,2%, що підтверджує значний екологічний ефект переходу на відновлювані джерела енергії.

Сіра вода від теплопостачання (845 м³/рік у базовому сценарії) пов'язана з роботою централізованих газових котелень, які також є джерелом викидів забруднюючих речовин, хоча й у менших обсягах порівняно з вугільними ТЕС. Розрахунок виконано з фактором 14,8 м³ сірої води на одну гікалорію теплової енергії, що відповідає типовим показникам для газових котелень (10-20 м³/Гкал).

При впровадженні заходів з теплоізоляції будівлі та оптимізації систем опалення потреба в централізованому теплопостачанні зменшується приблизно з 57 Гкал/рік до 48 Гкал/рік. Водночас підвищується ефективність використання теплової енергії, що зменшує питомий фактор сірої води. У результаті сіра вода від теплопостачання скорочується до 405 м³/рік (зменшення на 52,1% або 440 м³/рік). Загальне скорочення сірої води становить 2 400 м³/рік (74,3%), що є найбільшою складовою зменшення водного сліду і відображає системний екологічний ефект від переходу на чистіші джерела енергії.

Зелена вода, що відображає природні процеси випаровування атмосферних опадів з території медичного центру, залишається сталою у всіх розглянутих сценаріях – 45 м³/рік. Цей обсяг відпові-

дає випаровуванню приблизно 46 мм опадів на рік з площі даху будівлі (971,4 м²), що узгоджується з типовими гідрологічними характеристиками для м. Києва, де середньорічна кількість опадів становить близько 600 мм, а випаровування з непроникних поверхонь – 50-100 мм/рік. Зелена вода не залежить від типу енергетичної системи і визначається виключно кліматичними умовами та характеристиками території. Цей компонент має мінімальний внесок у загальний водний слід (1,1-3,5% залежно від сценарію) і не має суттєвого впливу на результати порівняльного аналізу.

Зменшення водоспоживання на 390 м³/рік характеризує загальну економію фізичного обсягу води з централізованого водопостачання для всіх потреб медичного центру, що включає як блакитну воду у водному сліді (285 м³/рік за рахунок медичних процесів та охолодження), так і додаткову економію в системах водовідведення, зменшення втрат у внутрішніх мережах та оптимізацію побутового водокористування (105 м³/рік). Водний слід є більш широким екологічним показником, що враховує не лише пряме споживання води закладом, але й системний вплив на водні екосистеми через ланцюг енергопостачання. Скорочення загального водного сліду на 2 685 м³/рік (67,9%) значно перевищує зменшення прямого водоспоживання, оскільки основний ефект досягається за рахунок компонента сірої води – зменшення опосередкованого забруднення водних ресурсів при переході на екологічно чисті джерела енергії.

Результати аналізу водного сліду доповнює визначення екологічних переваг від впровадження сонячної енергетики, розраховане за методологією Life cycle assessment (LCA) для терміну використання сонячних панелей 20 років, представлено в таблиці 2.

Для закладів України застосування LCA-підходу регламентується міжнародними стандартами ISO 14040:2006 (ISO 14040:2006 [6, 7]. Споживання води (Water Consumption) є однією з найбільш критичних категорій впливу, де спостерігається найбільше зменшення при впровадженні сонячної генерації. У базовому сценарії споживання води становить 232 525 м³ за весь час експлуатації, тоді як у сценарії СЕС + СНЕ цей показник знижується до 11 850 м³, що становить зменшення на 94,9%. За 20 років експлуатації впровадження сонячної електростанції дозволить зекономити 220 675 м³ прісної води.

Евтрофікація (Eutrophication) – процес надмірного збагачення водних екосистем біогенними еле-

ментами (азот, фосфор), що призводить до порушення екологічної рівноваги, «цвітіння» води та деградації водних об'єктів. Викиди, виражені в еквівалентах фосфатів, становлять 2038 кг РО₄-екв у базовому сценарії та 1104 кг РО₄-екв у сценарії СЕС + СНЕ, що відповідає зменшенню на 45,8%. Основним джерелом викидів, що спричиняють евтрофікацію, є спалювання викопного палива на електростанціях, оскільки при цьому утворюються оксиди азоту та фосфору, які потім осідають на поверхню водойм або потрапляють у них зі стічними водами. Впровадження сонячної генерації дозволяє знизити ці викиди на 934 кг РО₄-екв за 20 років, що еквівалентно запобіганню забруднення приблизно 47 кг чистого фосфору, здатного спричинити евтрофікацію значних водних площ. Слід зазначити, що повідомлялося, як впровадження відновлюваних джерел зменшує індекси евтрофікації (евтрофного потенціалу) на 25-40% протягом життєвого циклу енергооб'єкта у порівнянні з традиційною енергетикою [11, 17].

Головні висновки. Результати аналізу водного сліду свідчать, що найбільше його скорочення при переході на сонячну енергетику медичного закладу досягається завдяки зменшенню сірої води, тобто зниженню рівня техногенного забруднення водних екосистем. Це відображає системний ефект від впровадження відновлюваних джерел енергії, які не потребують великих обсягів води для виробництва електроенергії та тепла і не створюють значного забруднення водних ресурсів, на відміну від традиційних теплових станцій. Вплив евтрофікації – перенасичення середовища біогенними елементами, що призводить до деградації водних екосистем – також суттєво скорочується: на 61,6% для СЕС та на 70,7% для СЕС + СНЕ, що є наслідком зниження обсягів забруднення стічних вод і переходу на енергію, що не потребує водомістких процесів.

Отже, впровадження сонячної генерації у поєднанні з накопичувачами енергії та комплексними заходами з ресурсоефективності дозволяє не лише скоротити викиди парникових газів, а й суттєво знизити водний слід (на 67,9%), що є важливим внеском у підвищення екологічної стійкості медичних закладів. Такий результат підтверджує, що перехід до гібридної енергосистеми сприяє реалізації принципів ресурсоефективності та сталого розвитку відповідно до Цілей сталого розвитку ООН, зокрема ЦСР 6 «Чиста вода та санітарія» і ЦСР 13 «Боротьба зі зміною клімату».

Таблиця 2

Аналіз життєвого циклу для різних варіантів енергозабезпечення МЦ

Категорія впливу	Одиниця виміру	Базовий сценарій	СЕС	СЕС + СНЕ	Зменшення (СЕС+СНЕ vs Базовий)
Евтрофікація	кг РО ₄ -екв	2038	1071	1104	-45.8
Споживання води	м ³	232525	11850	11850	-94.9

Перспективи використання результатів дослідження. Порівняння варіантів підтвердило доцільність переходу МЦ «Інститут планування сім'ї» на гібридну систему енергозабезпечення, яка поєднує економічну ефективність і екологічну

безпечність протягом усього життєвого циклу. Отримані результати можуть бути використані для подібних медичних закладів для прогнозування впливу на довкілля при впровадженні сонячних фотоелектричних систем.

Література

1. Dion H., Evans M., Farrell P. Hospitals management transformative initiatives; towards energy efficiency and environmental sustainability in healthcare facilities. *Journal of Engineering, Design and Technology*. 2023. Vol. 21, Issue 2. PP. 552–584. doi: <https://doi.org/10.1108/JEDT-04-2022-0200>.
2. Sharma L., Singh J., Dhiman R., Vargas Nunez D., Antoinette E. B., Joshi K. J., Modi B., Padhi A., Tandon J. K., Seidel M. Advancing Solar Energy for Primary Healthcare in Developing Nations: Addressing Current Challenges and Enabling Progress Through UNICEF and Collaborative Partnerships. *Cureus*. 2024. 16 (1): e51571. doi: <https://doi.org/10.7759/cureus.51571>.
3. Health care's climate footprint: How the health sector contributes to the global climate crisis and opportunities for action. Health Care Without Harm and ARUP. 2019. 48 p. URL: https://global.noharm.org/sites/default/files/documents-files/5961/HealthCaresClimateFootprint_092319.pdf (request date: 15.06.2026).
4. Temel P., Kentel E., Alp E. Development of a site selection methodology for run-of-river hydroelectric power plants within the water-energy-ecosystem nexus. *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 856, Part 2. 159152. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159152>.
5. Water Footprint Network (WFN). URL: <https://www.waterfootprint.org/> (request date: 20.06.2026).
6. ISO 14040:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. Geneva: International Organization for Standardization, 2006. 17 p.
7. ISO 14044:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. Geneva: International Organization for Standardization. 2006. 37 p. URL: <https://surl.li/pmbchi> (request date: 15.06.2026).
8. Gerbens-Leenes W., Vaca-Jiménez S. D. Water Footprint and Energy Sustainability. *Water*. 2026. Vol. 18, Issue 13. 1632. doi: <https://doi.org/10.3390/w18131632>.
9. Chang Jo-Lei. Water Resource Challenges in the Renewable Energy Transition: A Life Cycle and Climate Nexus Perspective. *Science and Technology of Engineering, Chemistry, and Environmental Protection*. 2025. Vol. 1, No. 4, Issue 4. PP. 5246–5254. doi: <https://doi.org/10.61173/asst5246>.
10. Sevda Kuşkaya, Faik Bilgili, Erhan Muğaloğlu et al. The role of solar energy usage in environmental sustainability: Fresh evidence through time-frequency. *Renewable Energy*. 2023. Vol. 206. PP. 858–871.
11. IRENA Renewable power generation costs in 2025, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 2026. URL: https://www.irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2026/Jul/IRENA_TEC_RPGC_2025_Executive_summary_2026.pdf (request date: 25.05.2026).
12. Nidia S. Caetano, Florinda F. Martins, Gisela Marta Oliveira. Life cycle assessment of renewable energy technologies. In: *The renewable energy-water-environment nexus: monography* / edited by: Shahryar Jafarinejad and Bryan S. Beckingham. Amsterdam: Elsevier, 2024. PP. 37–79. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13439-5.00002-8>.
13. Shahryar Jafarinejad, Bryan S. Beckingham. Introduction to renewable energy–water–environment nexus. In: *The renewable energy-water-environment nexus: monography* / edited by: Shahryar Jafarinejad and Bryan S. Beckingham. Amsterdam: Elsevier, 2024. P. 133–141. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13439-5.00005-3>.
14. Оліненченко Ю.О., Білик Т.І., Дудар Т.В. Зменшення впливу на довкілля та енергонезалежність медичного закладу при впровадженні сонячних фотоелектричних панелей. *Відновлювана енергетика*. 2025. № 2 (81). С. 140–150. doi: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2\(81\).140-150](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2(81).140-150).
15. Оліненченко Ю. О. Енергоефективність закладів охорони здоров'я як чинник зменшення вуглецевого сліду. *Екологічні науки: науково-практичний журнал*. 2025. № 60. С. 88–92. doi: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.3-60.16>.
16. Оліненченко Ю. О. Зменшення викидів парникових газів при різних варіантах впровадження сонячних фотоелектричних систем у медичному закладі. *Екологічні науки: науково-практичний журнал*. 2025. № 63. С. 210–215. doi: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.6-63.33>.
17. Medalie L., Galanter A.E., Martinez A.J., Archer A.A., Luukkonen C.L., Harris M.A., Haynes J.V. Water use across the conterminous United States, water years 2010–20. In: *Geological Survey Integrated Water Availability Assessment–2010–20*. Chap. D, Professional Paper 1894–D. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2025. 56 p. doi: <https://doi.org/10.3133/pp1894D>.

Дата першого надходження статті до видання: 15.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026