

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МАРІУПОЛЬСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЕКОНОМІКО-ПРАВОВИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА РАЦІОНАЛЬНОГО ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ТА
ОХОРОНИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

До захисту допустити:
Завідувач кафедри

«__» _____ 20__ р.

**«SQM-ВИМІРЮВАННЯ ЯК ІНСТРУМЕНТ ЛОКАЛЬНОЇ ОЦІНКИ
СВІТЛОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ»**

Кваліфікаційна робота
здобувача вищої освіти першого бакалаврського рівня вищої освіти
освітньо-професійної програми «Екологія, охорона навколишнього середовища
та збалансоване природокористування»

Єгора Клокова

Науковий керівник:

Олена Миколаївна Пастернак

Рецензент:

Володимир Іванович Мокрий,

д.т.н., професор кафедри екологічної безпеки та природоохоронної діяльності
Національний університет «Львівська політехніка»

Кваліфікаційна робота захищена

з оцінкою _____

Секретар ЕК _____

«__» 20__ р.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНКИ СВІТЛОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ	
1.1. Світлове забруднення як чинник антропогенного тиску та його прояви.....	8
1.2. Екологічні й соціальні наслідки штучного освітлення вночі	13
1.3. Показники та підходи до оцінювання світлового забруднення: від польових вимірювань до дистанційних даних	16
РОЗДІЛ 2. SQM-ВИМІРЮВАННЯ: ФІЗИЧНІ ОСНОВИ, ПРИЛАДИ ТА МЕТОДИКА ПОЛЬОВОГО МОНІТОРИНГУ	
2.1. Фізичні основи фотометричних вимірювань яскравості нічного неба та одиниці SQM	22
2.2. Прилади Sky Quality Meter: принцип роботи, типи та метрологічні характеристики.....	28
2.3. Методика організації SQM-моніторингу: протокол вимірювань, контроль якості й невизначеність.....	30
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ SQM-ОЦІНЮВАННЯ СВІТЛОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ	
3.1. Порівняльна SQM-оцінка для країн Європейського Союзу	36
3.2. SQM-оцінка світлового забруднення в Україні.....	41
3.3. Практичні рекомендації за результатами SQM-аналізу: модель локального моніторингу та управління зовнішнім освітленням.....	46
ВИСНОВКИ	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	57

ВСТУП

Актуальність теми дослідження світлового забруднення зумовлена стрімким зростанням антропогенного навантаження на природне середовище в умовах урбанізації, технологічного розвитку та розширення систем штучного освітлення. Світлове забруднення розглядається як одна з форм екологічної деградації, що виникає внаслідок надмірного або нераціонального використання штучного світла, яке порушує природні цикли освітлення та темряви. На відміну від традиційних видів забруднення, воно має специфічний нематеріальний характер, однак його вплив є системним і охоплює як природні екосистеми, так і соціальне середовище, що визначає необхідність його комплексного наукового аналізу.

Особливу актуальність проблеми посилює той факт, що світлове забруднення є одним із найшвидше зростаючих глобальних екологічних чинників, інтенсивність якого щорічно збільшується в середньому на 2–10% [6, с.2591]. Така динаміка безпосередньо пов'язана з поширенням енергоефективних, але часто надмірно інтенсивних джерел освітлення, зокрема світлодіодних технологій, а також із недостатнім урахуванням екологічних стандартів при організації міського освітлення. У результаті формується так званий ефект «світлового купола» (skyglow), який поширюється на значні території та істотно змінює природні характеристики нічного неба, що негативно позначається як на довкіллі, так і на якості життя населення [26].

Наукова значущість дослідження зумовлена також комплексним характером впливу світлового забруднення. З одного боку, воно призводить до порушення функціонування екосистем, змінюючи поведінкові реакції тварин, міграційні процеси та біологічні ритми організмів. Зокрема, штучне освітлення дезорієнтує нічних тварин, впливає на популяції комах і птахів, а також змінює структуру екосистемних зв'язків [26]. З іншого боку, доведено його негативний вплив на здоров'я людини, зокрема через порушення циркадних ритмів, зниження якості сну та потенційне зростання ризику хронічних захворювань.

Це свідчить про міждисциплінарний характер проблеми, яка перебуває на перетині екології, медицини, урбаністики та публічного управління.

Важливим аспектом актуальності є також недостатній рівень моніторингу та кількісного оцінювання світлового забруднення, особливо в країнах, що розвиваються або перебувають у стані трансформації. Традиційні підходи до оцінювання, засновані на візуальних спостереженнях або непрямих показниках, поступово доповнюються сучасними інструментами, зокрема фотометричними вимірюваннями яскравості нічного неба та аналізом супутникових даних. У цьому контексті особливого значення набувають технології типу Sky Quality Meter (SQM), які забезпечують об'єктивізацію даних і дозволяють здійснювати порівняльний аналіз рівнів світлового забруднення в різних регіонах.

Не менш важливою є практична складова дослідження, оскільки світлове забруднення безпосередньо пов'язане з енергоспоживанням, економічною ефективністю та безпекою міського середовища. Нераціональне використання освітлення призводить до втрат енергії та фінансових ресурсів, тоді як оптимізація освітлювальних систем може одночасно зменшити екологічне навантаження та підвищити комфорт і безпеку населення. Таким чином, дослідження світлового забруднення має прикладне значення для формування ефективної політики у сфері міського планування та сталого розвитку.

Отже, актуальність теми зумовлена поєднанням екологічних, соціальних і технологічних чинників, а також зростаючою потребою у розробленні науково обґрунтованих підходів до оцінювання та управління світловим забрудненням. У цьому контексті використання SQM-вимірювань як інструменту кількісного аналізу дозволяє поглибити розуміння масштабів проблеми та сформувати ефективні механізми її мінімізації.

Об'єкт дослідження - нічне світлове середовище (якість нічного неба) на урбанізованих, приміських, сільських і природоохоронних територіях, що формується під впливом штучного освітлення у темний час доби.

Предмет дослідження - показники яскравості нічного неба, виміряні приладами SQM у одиницях mag/arcsec², просторово-часові відмінності цих показників

Ступінь наукової розробленості проблеми світлового забруднення у спеціальній літературі, зокрема в українському науковому просторі, характеризується наявністю окремих досліджень, які формують базові теоретичні та прикладні підходи до аналізу цього явища, однак загалом залишаються фрагментарними та потребують подальшого розвитку. Зокрема, одним із ранніх напрямів дослідження є роботи Ю. Семківа та В. Андрійчука, які розглядають світлове забруднення атмосфери як результат інтенсивного техногенного розвитку та підкреслюють масштаби його поширення, зокрема значне зростання яскравості нічного неба в урбанізованих регіонах .

Вагомий внесок у вивчення регіональних особливостей світлового забруднення здійснили А. Жук та О. Зароченцева, які досліджують екологічні аспекти цього явища на прикладі окремих територій України, зокрема Чернівецької області, акцентуючи увагу на зростанні його інтенсивності та впливі на навколишнє середовище. У контексті урбаністичних і просторових досліджень варто виокремити роботи О. Намчук, яка аналізує світлове забруднення як комплексне явище, що поєднує екологічні, соціальні та естетичні аспекти функціонування міського середовища, підкреслюючи його вплив на якість життя населення та необхідність інтегрованого підходу до управління освітленням . Окремий напрям становлять дослідження, присвячені технологічним аспектам і способам зменшення світлового забруднення, зокрема роботи А. Яценка та Л. Роєнко, у яких розглядаються методи оптимізації освітлення та роль світлодизайну як інструменту зниження негативного впливу штучного світла .

Крім того, розвиток емпіричних досліджень у цій сфері пов'язаний із реалізацією науково-прикладних проєктів, зокрема із використанням супутникових даних. Так, у межах проєкту Night Lights, реалізованого за участю Інституту космічних досліджень НАН України, здійснюється аналіз

світлового забруднення території України з використанням дистанційного зондування, що дозволяє оцінювати його просторові закономірності та зв'язок із розвитком систем зовнішнього освітлення. Водночас, попри наявність окремих напрацювань, ця тематика ще не отримала достатньо системного розвитку, що зумовлює необхідність подальших комплексних досліджень із використанням сучасних методів, зокрема фотометричних вимірювань і дистанційного аналізу.

Мета роботи - обґрунтування можливості використання SQM-вимірювань як інструменту локальної оцінки світлового забруднення.

Завдання дослідження

1. Розкрити теоретичні засади світлового забруднення як чинника антропогенного тиску та окреслити його ключові прояви й наслідки.

2. Узагальнити підходи до оцінювання світлового забруднення та показати місце локальної фотометрії серед інших методів.

3. Розкрити фізичні основи фотометричних вимірювань яскравості нічного неба та зміст одиниць $\text{mag}/\text{arcsec}^2$.

4. Охарактеризувати прилади SQM (принцип дії, поле зору, повторюваність, джерела похибок) і визначити умови коректного застосування.

5. Сформулювати протокол організації SQM-моніторингу та підходи до контролю якості/невизначеності результатів.

6. Відібрати та підготувати дані із фокусом на записах із SQM-показами для країн ЄС: визначити часові рамки, критерії мінімальної достатності даних для порівнянь.

7. Провести статистичне узагальнення і порівняння SQM-показників між країнами ЄС (оцінити варіативність, сформувати групування/ранжування за рівнем «темності неба» з урахуванням обмежень даних).

8. Виконати аналогічний аналіз для України: просторове узагальнення, виділення відмінностей за типами місцевості та інтерпретація з урахуванням нерівномірності спостережень.

9. На основі отриманих результатів сформувані практичні рекомендації: модель локального моніторингу (мережа пунктів, частота, протокол, метадані) та пріоритетні заходи управління освітленням у «гарячих точках» і буферних зонах природоохоронних територій.

У роботі застосовано **методи** аналізу наукових і нормативних джерел для формування теоретичної бази дослідження. Фотометричний підхід (SQM) використано для вимірювання яскравості нічного неба як основного показника світлового забруднення. Для обробки даних застосовано методи очищення та підготовки (перевірка координат, видалення дублікатів, відбір коректних значень). Описову та порівняльну статистику використано для узагальнення результатів і зіставлення рівнів світлового забруднення. Просторовий аналіз здійснено шляхом картографування та агрегування даних за територіями. Інтерпретація результатів проводилася з урахуванням зовнішніх факторів (погодні умови, місячне світло, локальні джерела освітлення).

Інформаційна база дослідження. Емпіричну основу становлять відкриті дані Globe at Night (записи спостережень із можливими SQM-вимірюваннями та метаданими). Теоретичну й методичну базу формують наукові публікації з проблематики світлового забруднення та фотометричного моніторингу, а також нормативні й довідкові матеріали, що регулюють/описують підходи до зовнішнього освітлення та екологічних критеріїв планування.

Практичне значення полягає в адаптації підходу локальної оцінки світлового забруднення на основі SQM-вимірювань до порівняльного аналізу «ЄС-Україна» з використанням відкритих масивів даних Globe at Night, а також у методичному обґрунтуванні процедур відбору, очищення та інтерпретації таких даних з урахуванням їх нерівномірності та чинників, що впливають на результати вимірювань.

Структура роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, та списку використаних джерел. В роботі 9 таблиць, 1 рисунок, 49 джерел.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНКИ СВІТЛОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ

1.1. Світлове забруднення як чинник антропогенного тиску та його прояви

Світлове забруднення в сучасній науковій літературі описують як наслідок штучного освітлення, що змінює природний нічний світловий режим. У найуживанішій термінології дослідники використовують поняття *artificial light at night (ALAN)*, а в ширшому екологічному сенсі – *light pollution*. Офіційний європейський звіт 2022 року зазначає, що світлове забруднення зазвичай розуміють як зростання природної яскравості нічного неба через штучне світло, а в окремих визначеннях наголошують і на його негативній природі як деградації темряви та наслідку надмірного або небажаного освітлення [13].

У сучасних оглядах підкреслюється, що нічне середовище нині зазнає «безпрецедентних змін» через введення штучних джерел світла, які змінюють природні цикли світла й темряви. Огляд *Annual Reviews* 2022 року прямо вказує, що ALAN розглядають одночасно як джерело користі для суспільства і як джерело екологічних витрат, а також як фактор, негативні наслідки якого доводиться пом'якшувати новими підходами до освітлення [16, с.375].

Важливо розрізняти природне нічне світіння і світлове забруднення. Природне нічне небо формується без участі людини, тоді як світлове забруднення виникає тоді, коли штучне світло змінює природну темряву, підвищує фонову яскравість неба або проникає в простори, де його бути не повинно [13]. Саме тому в науковій літературі ALAN дедалі частіше описують не просто як освітлення, а як антропогенний стресор, що впливає на біологічні ритми, поведінку і взаємодії між організмами.

Одним із підходів до класифікації світлового забруднення є поділ на астрономічне та екологічне світлове забруднення. Європейський звіт зазначає,

що астрономічне світлове забруднення пов'язане зі зниженням видимості небесних об'єктів через яскравість неба, тоді як екологічне – з порушенням нічного середовища для живих організмів [9]. Міжнародна асоціація темного неба пов'язує світлове забруднення з такими проявами, як glare, skyglow, light trespass та clutter, а СІЕ трактує його як сукупний негативний вплив штучного світла.

До основних форм прояву світлового забруднення належать засвічення неба (skyglow), засліплення (glare), світлове проникнення (light trespass) та світлове нагромадження (clutter). У систематичному огляді ці явища подано як базові категорії: glare визначено як дискомфорт або порушення зору через надмірну яскравість; light trespass – як небажане проникнення світла в приміщення або на території, де воно не потрібне; clutter – як надмірне, візуально перевантажене скупчення джерел світла; skyglow – як штучне сяйво нічного неба [32, с.1107]. Така класифікація є ключовою для коректного опису світлового забруднення в науковому тексті.

Skyglow є найбільш помітною широкомасштабною формою світлового забруднення. У звіті ЕЕА сказано, що штучне світло, відбите і розсіяне аерозолями, краплями води та частинками в атмосфері, може проникати в навколишні екосистеми, охоронювані території та навіть сільські райони; при цьому світіння великих міст іноді видно на відстані понад 160 км [13]. Skyglow належить до форм забруднення і безпосередньо шкодить астрономічним спостереженням та природному нічному середовищу.

Glare у сучасних оглядах пов'язують не лише з візуальним дискомфортом, а й із порушенням здатності людини або тварини нормально орієнтуватися в темряві. Систематичний огляд 2022 року визначає glare як зоровий і фізичний дискомфорт, що виникає тоді, коли яскравість перевищує поріг, який може безпечно обробити зоровий апарат [32, с.1107]. У контексті зовнішнього освітлення це особливо важливо для вулиць, транспортних вузлів, фасадного підсвічування та рекламних конструкцій.

Light trespass описує небажане проникнення світла в простори, які мають залишатися темними. У звіті ЕЕА прямо вказано, що це антропогенне світло, яке потрапляє туди, де воно не є очікуваним або необхідним, зокрема в житлові приміщення; у систематичному огляді 2022 року підкреслено, що light trespass також застосовують до природних біотопів і садових або приватних територій [13]. Для оцінки цього явища в сучасних стандартизованих підходах використовують вертикальну освітленість і показники проникнення світла в контрольовані простори.

Clutter у науковому розумінні означає візуально перевантажене середовище, де надмірна кількість світлових джерел або світлових акцентів створює хаос і погіршує сприйняття простору. У сучасних оглядах цей компонент відносять до однієї з базових форм світлового забруднення поряд зі skyglow, glare і light trespass [20, с.2750]. Для міського середовища це має значення не лише естетичне, а й функціональне, оскільки надлишок світла ускладнює нормальне користування нічним простором і збільшує енергетичні втрати.

Окремого значення в останніх публікаціях набуває спектральний склад штучного світла. Огляд Annual Reviews 2022 року наголошує, що поширення LED-технологій стало не лише технологічною зміною, а й зміною екологічних наслідків освітлення, оскільки багато зовнішніх LED-джерел мають істотні випромінювання в синій частині спектра, до якої багато біологічних реакцій особливо чутливі [16, с.376]. Саме тому в сучасній літературі спектр розглядають як один з головних параметрів, що визначає силу впливу ALAN.

Цей спектральний аспект безпосередньо пов'язаний із біологічними наслідками. У 2025 році в Nature Climate Change наголошено, що зміни в яскравості та спектральній структурі нічного середовища змінюють фізіологію, поведінку й екологічні взаємодії організмів, а отже впливають на процеси, важливі для функціонування екосистем [19, с.1372]. Автори також зазначають, що ALAN уже охоплює значну частину суходільних екосистем і діє як фактор,

здатний змінювати часову узгодженість біологічних процесів у трофічних мережах.

Не менш важливим є просторово-часовий режим освітлення. Сучасні огляди підкреслюють, що світлове забруднення треба оцінювати не лише за інтенсивністю, а і за тим, де, коли та як довго діє світло. Оцінювання освітленого середовища включає вертикальну освітленість, яскравість у полі зору, світлове проникнення у вікна та інші параметри, а також врахування часових обмежень роботи світильників [20, с.2750]. Це означає, що нічне освітлення є не статичним явищем, а режимом антропогенного впливу з власною просторовою та часовою структурою.

Саме тому сучасні дослідження наголошують, що для оцінки світлового забруднення не існує одного універсального приладу чи методу. Різні інструменти мають різні переваги й обмеження, а жоден із них не задовольняє всі вимоги одночасно (табл.1.1) [31]. Це означає, що у практиці дослідження світлового забруднення поєднують супутникові дані, наземні вимірювання, фотометричні підходи та просторове моделювання.

Таблиця 1.1

Основні форми світлового забруднення та їх наслідків

Форма світлового забруднення	Наукове визначення	Основні джерела виникнення	Характерні прояви	Потенційні наслідки
Skyglow (засвічення нічного неба)	Підвищення природної яскравості нічного неба внаслідок розсіювання штучного світла в атмосфері	Вуличне освітлення, фасадна підсвітка, промислові об'єкти, рекламні конструкції, транспортні вузли	Світіння над містами, зменшення видимості зірок, поширення світлового ореолу на значні відстані	Погіршення умов астрономічних спостережень, порушення природної темряви, вплив на нічні екосистеми
Glare (засліплення)	Надмірна яскравість, що спричиняє зоровий дискомфорт або зниження здатності бачити	Прожектори, неправильно встановлені світильники, автомобільні фари, LED-екрани	Тимчасове осліплення, дискомфорт, втрата контрастності зору	Підвищення аварійності, погіршення орієнтації людей і тварин, зорове навантаження

Продовження табл.1.1

Light trespass (світлове проникнення)	Потрапляння штучного світла у простір, де воно не потрібне або небажане	Ліхтарі біля житлових будинків, реклама, декоративне освітлення, приватні системи підсвітки	Освітлення вікон, дворів, природних територій у нічний час	Порушення сну людини, зміна поведінки тварин, зниження якості життя
Clutter (світлове нагромадження)	Надмірна концентрація різнорідних джерел світла в обмеженому просторі	Рекламні вивіски, щільна забудова, комерційні квартали, транспортні магістралі	Візуальний хаос, перевантаження міського простору, втрата навігаційної чіткості	Погіршення естетики середовища, дезорієнтація водіїв і пішоходів, зайві енерговитрати
Спектральне забруднення	Негативний вплив світла певного спектрального складу, насамперед синьої частини спектра	LED-освітлення холодного білого кольору, цифрові екрани, сучасні рекламні панелі	Надлишок короткохвильового випромінювання вночі	Порушення циркадних ритмів, пригнічення мелатоніну, вплив на комах, птахів і людину
Часове світлове перевантаження	Надмірна тривалість або невиправданий режим роботи освітлення в нічний час	Цілодобове освітлення вулиць, фасадів, комерційних об'єктів	Освітлення без урахування часу доби та реальної потреби	Марнотратство енергії, посилення ALAN, зростання екологічного навантаження

Джерело: складено автором на основі [13; 16; 20; 31; 32].

Отже, світлове забруднення слід розглядати як багатовимірний антропогенний чинник, який змінює не лише вигляд нічного середовища, а й його екологічні функції. Сучасні огляди сходяться на тому, що ALAN є поширеним, зростаючим і біологічно значущим стресором; його наслідки проявляються на рівні фізіології, поведінки, біоритмів, взаємодій між видами та функціонування екосистем.

1.2. Екологічні й соціальні наслідки штучного освітлення вночі

Штучне освітлення вночі в сучасній літературі розглядається не лише як інфраструктурна складова урбанізованого середовища, а як окремий фактор антропогенного тиску, що змінює природний режим світла і темряви. У великих оглядах останніх років підкреслюється, що ALAN є поширеним явищем, яке має не тільки корисний для суспільства вимір, а й виражені екологічні витрати [16, с.376].

Для тварин найбільш загальним і добре підтвердженим наслідком ALAN є порушення циркадної організації поведінки та фізіології. Аналіз біологічних ефектів штучного світла вночі показав, що експозиція ALAN викликає виражені реакції за фізіологічними показниками, щоденною активністю, поведінкою та деякими репродуктивними параметрами [22, с.347].

Особливо вразливими є нічні та сутінкові види, для яких темрява є умовою нормальної орієнтації, пошуку корму й уникнення хижаків. У дослідженні міграційних зупинок птахів на території США *skyglow* виявився впливовим і послідовним фактором щільності міграційних ділянок у більш ніж 70% моделей, що свідчить про сильну просторову чутливість міграційних процесів до яскравості нічного неба [21]. Для кажанів нещодавні дослідження також показують зміну поведінки: штучне освітлення може переорієнтовувати кормову активність, причому частина світлолюбних видів отримує перевагу, тоді як нечутливі види зазнають негативного впливу.

ALAN впливає не лише на окремі організми, а й на трофічні взаємодії. У контрольованому польовому експерименті з природними рослинно-запилювальними угрупованнями було показано, що штучне нічне освітлення змінює денні взаємодії між рослинами та запилювачами; у частини видів кількість взаємодій зменшувалася, у частини – зростала, а склад відвідувачів змінювався залежно від групи комах [17, с.1690]. Автори окремо підкреслюють, що вплив ALAN не обмежується ніччю: він може поширюватися на денні

екологічні процеси через «відкладені» або непрямі ефекти на спільноти запилювачів і на функцію запилення.

У рослинному компоненті наслідки ALAN нині пов'язують насамперед із фенологічними зсувами. Сучасні роботи показують, що штучне освітлення вночі здатне впливати на строки розвитку міських дерев і на тривалість вегетаційного періоду, а також змінювати час весняного запуску й осіннього завершення росту. У публікаціях ALAN описують як недостатньо досліджений, але реальний стресор для міських дерев, який суттєво впливає на їхню фенологію; інші дослідження прямо показують, що ALAN може подовжувати міські сезони росту [40].

Для людини наслідки ALAN пов'язані насамперед із порушенням циркадної системи, сну та пов'язаних із ними фізіологічних процесів. Сучасні огляди 2023–2024 років пов'язують нічне освітлення з дисбалансом циркадних ритмів, розладами сну, змінами настрою, а також із метаболічними та ендокринними ризиками; окремі огляди також обговорюють асоціації між ALAN і психічним здоров'ям, зокрема через центральну роль розладів сну [24, с.396]. Важливо, що в цих роботах мова йде саме про зв'язок та асоціацію, а не про один-єдиний механізм, оскільки вплив ALAN залежить від інтенсивності, спектра, часу експозиції та індивідуальної чутливості.

Соціальний вимір проблеми полягає також у зміні якості середовища проживання. Європейський звіт підкреслює, що світлове забруднення є не лише екологічною, а й суспільною проблемою, оскільки впливає на здоров'я людей, на стан екосистем і на загальну якість нічного простору. У практичному плані це означає небажане проникнення світла в житлові приміщення, перевантаження міського простору надмірною яскравістю, погіршення нічного відпочинку та зростання енергетичної неефективності освітлення [13]. У сучасних оглядових матеріалах підкреслюється, що оцінка наслідків ALAN повинна враховувати не лише біологічні, а й екологічні та соціальні ефекти.

Окреме значення має збереження природної темряви на природоохоронних територіях. IUCN визначає світлове забруднення як

наявність небажаного, недоречного або надмірного штучного освітлення та наголошує, що воно може мати різноманітні негативні наслідки; у своїх матеріалах організація також зазначає, що світлове забруднення загрожує екологічній цілісності територій. UNESCO, у свою чергу, пов'язує питання темного неба з тематичною ініціативою з астрономії та окремо наголошує на значущості темного нічного неба й небесних об'єктів як предмета охорони [27]. Для заповідних територій це означає, що збереження темряви є частиною підтримання природних процесів, а не лише візуальною чи туристичною характеристикою.

Для астрономічних спостережень світлове забруднення є прямою перешкодою, оскільки skyglow знижує видимість слабких небесних об'єктів і загалом посилює яскравість нічного неба. Дослідження на основі понад 51 тисячі громадянських спостережень показало глобальне зменшення видимості зірок у 2011–2022 роках, що може бути пояснене зростанням яскравості неба на 7–10% на рік у видимому діапазоні [8, с.265].

З метою узагальнення багатовекторного впливу штучного освітлення вночі доцільно систематизувати основні екологічні та соціальні наслідки ALAN за об'єктами впливу (табл.1.2).

Таблиця 1.2

Екологічні й соціальні наслідки штучного освітлення вночі

Сфера впливу	Основні прояви наслідків	Механізм впливу	Потенційні довгострокові результати
Тваринний світ	Порушення добової активності, зміна поведінки, дезорієнтація мігруючих видів, зміни репродуктивної поведінки	Зміна природного циклу світла і темряви, вплив на циркадні ритми	Скорочення чисельності окремих видів, зміна структури популяцій, зниження біорізноманіття
Птахи	Порушення маршрутів міграції, концентрація біля освітлених об'єктів, виснаження	Реакція на skyglow та яскраві джерела світла	Зростання смертності, зміна міграційних шляхів
Комахи та запилювачі	Зменшення активності частини видів, зміна складу запилювачів, дезорієнтація	Приваблення до штучного світла, порушення нічної активності	Погіршення процесів запилення, зміна трофічних мереж

Продовження табл.1.2

Рослинний світ	Зсув строків цвітіння, подовження вегетації, зміна сезонних циклів	Вплив світла на фотоперіодичні реакції рослин	Порушення фенологічної синхронності, зміни міських екосистем
Здоров'я людини	Порушення сну, втома, стрес, циркадний дисбаланс	Нічна експозиція світла, пригнічення секреції мелатоніну	Підвищення ризиків метаболічних, психоемоційних та ендокринних розладів
Соціальне середовище	Зниження комфорту проживання, світло у вікнах, перевантаження простору рекламою	Надмірне або неправильно спрямоване освітлення	Погіршення якості життя, зростання скарг населення
Енергетика та економіка	Надлишкове споживання електроенергії, неефективні витрати на освітлення	Використання зайвих або застарілих систем освітлення	Зростання витрат бюджетів і домогосподарств, більший вуглецевий слід
Астрономічні спостереження	Зниження видимості зірок і слабких небесних об'єктів	Підвищення яскравості нічного неба (skyglow)	Погіршення умов наукових досліджень та втрати культурної цінності нічного неба
Природоохоронні території	Порушення природної темряви, зміна поведінки видів у заповідниках	Поширення світіння міст і туристичної інфраструктури	Зниження екологічної цілісності природних територій

Джерело: складено автором на основі [8; 13; 16; 21; 22; 24; 27; 40].

Отже, сучасні дослідження дозволяють розглядати ALAN як багаторівневий чинник, що одночасно впливає на біоритми тварин, трофічні зв'язки, фенологію рослин, здоров'я людини, якість середовища проживання та можливості астрономічних спостережень.

1.3. Показники та підходи до оцінювання світлового забруднення: від польових вимірювань до дистанційних даних

Оцінювання світлового забруднення в сучасній літературі ґрунтується на поєднанні польових фотометричних спостережень, спектральних вимірювань, наземних камерних методів і супутникового дистанційного зондування. Для ALAN не існує єдиного інструмента, який одночасно задовольняв би всі

дослідницькі завдання; саме тому коректне вимірювання потребує добору методики відповідно до мети дослідження, а також чіткого опису положення приладу, напрямку наведення й умов спостереження [31]. Окремо підкреслено, що помилки в методології можуть призводити до хибних висновків, а узгоджені терміни й одиниці є критично важливими для міждисциплінарного порівняння (табл.1.3).

Таблиця 1.3

Основні показники та підходи до оцінювання світлового забруднення

Підхід до оцінювання	Основні показники	Інструменти / джерела даних	Переваги	Обмеження
Наземні фотометричні вимірювання	NSB (night sky brightness), яскравість неба, mag/arcsec ² , люкс	Sky Quality Meter (SQM), фотометри, люксметри	Висока точність у конкретній точці, пряме вимірювання skyglow	Локальний характер даних, залежність від погоди та калібрування
Спектральні вимірювання	Спектральний склад світла, частка синього спектра, колірна температура (CCT)	Спектрометри, багатоканальні сенсори	Дає змогу оцінити біологічний вплив освітлення	Складність обладнання, висока вартість
Камерні та панорамні методи	Просторовий розподіл яскравості, засвічення горизонту	DSLR-камери, fisheye-камери, all-sky imaging	Візуалізація структури світлового поля, картографування skyglow	Потребує спеціальної обробки зображень
Супутникове дистанційне зондування	Радіанс нічного світіння, динаміка освітлення територій	VIIRS DNB, NASA Black Marble, SDGSAT-1	Охоплення великих територій, аналіз часових рядів	Не відображає безпосередньо наземну NSB, нижча деталізація
Просторове моделювання	Карти поширення світлового впливу, прогнозні сценарії	GIS-моделі, комбіновані наземні та супутникові дані	Дає змогу прогнозувати ефекти та планувати політику освітлення	Залежить від якості вхідних даних
Мережі локального моніторингу	Тренди змін освітлення в реальному часі	Стаціонарні сенсори, IoT-датчики	Безперервний контроль, підтримка управлінських рішень	Потребує інвестицій та технічного обслуговування

Джерело: складено автором на основі [12; 15; 22; 23; 25; 29; 30; 31; 35; 49]

Найуживанішим фотометричним показником є яскравість нічного неба або night sky brightness (NSB). У практиці її зазвичай вимірюють у зеніті, тобто для ділянки неба над точкою спостереження, використовуючи фотометрично відкалібровані прилади або радіометри. Найпоширенішим радіаційним сенсором для моніторингу NSB є Sky Quality Meter, а його вимірювальна смуга лежить у діапазоні приблизно 375–625 нм; водночас автори підкреслили, що довготривала стабільність SQM є суттєвою умовою надійного трендового аналізу [15, с.516]. Це означає, що NSB є не абстрактною оцінкою темряви, а вимірюваною величиною, чутливою до спектральних властивостей джерела, стану атмосфери й стану самого приладу.

NSB трактують як базовий індикатор світлового забруднення, особливо для оцінювання skyglow. У дослідженні, яке поєднало SQM-спостереження з даними дистанційного зондування, NSB використано як основний індикатор для побудови локальних карт світлового забруднення, а самі автори підкреслили, що skyglow є найпрямішим проявом світлового забруднення, який виникає внаслідок розсіювання світла в атмосфері [49, с.1332]. Водночас та сама праця показала, що сучасні політики контролю часто орієнтуються лише на обмеження джерела світла, але не відображають повною мірою просторове поширення впливу, що ще раз підтверджує цінність локальних вимірювань.

Проблема порівнянності фотометричних даних залишається однією з центральних. Відсутність стандартизованої метрології та використання приладів із різною спектральною чутливістю і різними польовими одиницями ускладнюють змістовне порівняння результатів між майданчиками й інструментами [22, с.347]. Автори також наголосили, що навіть повітряне світіння не є незначущим фоном: у темних місцях його внесок може бути помітним і його треба враховувати при інтерпретації даних. Звідси випливає принципова вимога: зіставлення NSB у часі й просторі можливе лише за умови сумісності одиниць, спектральної чутливості та методів калібрування.

Окрему категорію становлять радіометричні та супутникові показники. У супутниковій практиці нічне світло часто оцінюють через яскравість у верхній

атмосфері або на виході з поверхні, а не через безпосередню яскравість зеніту. NASA Black Marble, наприклад, працює з продуктами VIIRS DNB на просторовій роздільності 15 arc-second і з 2012 року донині, а алгоритм коригує дані з урахуванням атмосфери, рельєфу, місячного освітлення, рослинності, снігу та stray light [35]. Це робить супутникові дані придатними для великих масштабів і довгих часових рядів, але не скасовує відмінностей між тим, що бачить супутник, і тим, що реально сприймається з поверхні або в приземному шарі атмосфери.

Для NOAA VIIRS продуктів характерно, що вони формуються як щомісячні та річні композити, а користувачеві пропонуються різні конфігурації обробки. У вказівках NOAA зазначено, що версія vcm виключає дані, уражені stray light, тоді як vcmsl включає stray-light-corrected дані, але має знижену якість, хоч і дає краще покриття на високих широтах [12]. Це принципово важливо для інтерпретації трендів: одна й та сама територія може мати різну доступність даних залежно від того, чи застосовано корекцію, а отже порівняння в часі повинно спиратися на однакові продукти й однакові правила відбору.

У супутниковому оцінюванні є і структурні межі застосування. Огляд з дистанційного зондування нічних вогнів виділив п'ять ключових викликів: створення хмарної маски, відстеження добових змін, урахування часу перельоту супутника, кількісне оцінювання синьої складової та вимірювання анізотропії нічного світіння [25]. У тій самій роботі показано, що для глибшого аналізу доцільно поєднувати наземні датчики, UAV-знімання та супутникові сенсори, оскільки кожен рівень спостереження фіксує різні аспекти явища. Отже, супутникові дані найкраще працюють на рівні регіонів і великих територій, але вони не замінюють локального сенсорного контролю.

Ще один важливий обмежувальний чинник супутникових продуктів – просторово-часова неоднорідність. В провідному дослідженні К. Лаброссе, де порівнювали HPS та LED освітлення за наземними й супутниковими спостереженнями, автори показали, що зміни нічної яскравості й кольору

можна виявляти одночасно із землі та з орбіти, але для цього потрібні різні інструменти: TESS-4C, LANcube і SDGSAT-1 відображають не ідентичні характеристики світла [23]. Це підкреслює, що супутникова яскравість і наземна NSB не є взаємозамінними показниками; вони радше описують різні «проекції» одного явища.

Саме тому в дослідженнях світлового забруднення принципово важливе поєднання локальних вимірювань із дистанційними даними. Наземні прилади дають змогу оцінити реальну яскравість неба в конкретній точці, перевірити вплив хмарності, повітряного світіння, сезонності та локальної забудови, а також відстежити зміни після втручання у освітлення [49, с.1332]. Супутникові дані, навпаки, забезпечують систематичний огляд великих площ і дозволяють будувати просторові тренди, але мають нижчу деталізацію щодо конкретних джерел і локальної геометрії. Локальні карти NSB виявляють значні регіональні відмінності та можуть підтримувати практичні стратегії пом'якшення світлового забруднення.

Для просторового порівняння важливим є також вибір кроку сітки та репрезентативність вимірювальної мережі. Модельне дослідження Каталонії показало, що для тонких деталей нічної яскравості мінімально доцільною є просторовість 1×1 км, тоді як 5×5 км придатніша для загальних тенденцій на великих територіях [29]. Автори також зазначили, що розбіжності між розрахунковими картами й вимірами можуть виникати через невідповідність точок спостереження, різний природний фон і атмосферний вміст. Отже, порівняння світлового забруднення в просторі без урахування масштабу може бути методологічно некоректним.

Роль локальних вимірювань особливо велика для управління освітленням. Дослідження оптимізації мережі сенсорів показало, що розміщення датчиків слід прив'язувати не тільки до інтенсивності світіння на нічних знімках, а й до екологічної вразливості території [30]. Автори прямо вказали, що фізичні вимірювання необхідні для безперервного моніторингу й верифікації теоретичних моделей, а найбільш репрезентативними можуть бути точки в

найбільш вразливих зонах міста. Це означає, що локальна мережа вимірювань є не допоміжною, а управлінською ключовою складовою системи контролю освітлення.

Такий же висновок підтримує і позиція CIE: локальна влада має знати, що саме потрібно освітлювати в конкретному середовищі, а нові технології дають змогу регулювати спектральний склад, просторовий розподіл і рівень світла в різні моменти часу [34]. Штучне світло вночі не може оцінюватися лише за наявністю ламп або загальною інтенсивністю мережі; потрібна оцінка того, чи подано «правильне світло в правильному місці та в правильний час».

Отже, сучасне оцінювання світлового забруднення базується на багаторівневій схемі: фотометричні спостереження фіксують реальну яскравість нічного неба, радіометричні й супутникові продукти описують великомасштабний просторовий розподіл нічного світіння, а локальні мережі вимірювань забезпечують перевірку моделей і підтримку рішень з освітлення.

РОЗДІЛ 2

SQM-ВИМІРЮВАННЯ: ФІЗИЧНІ ОСНОВИ, ПРИЛАДИ ТА МЕТОДИКА ПОЛЬОВОГО МОНІТОРИНГУ

2.1. Фізичні основи фотометричних вимірювань яскравості нічного неба та одиниці SQM

Фотометричні вимірювання яскравості нічного неба є ключовою складовою сучасного моніторингу світлового забруднення, оскільки дозволяють кількісно оцінити інтегральний світловий фон атмосфери в умовах природного та антропогенного впливу. У польовій практиці найпоширенішим інструментом таких вимірювань є Sky Quality Meter (SQM), який реєструє яскравість нічного неба у логарифмічних одиницях $\text{mag}/\text{arcsec}^2$ – стандарті астрономічної фотометрії поверхневої яскравості (рис.2.1)



Рис.2.1 Sky Quality Meter (SQM) [41]

Показник $\text{mag}/\text{arcsec}^2$ є фотометричною мірою яскравості нічного неба, вираженою в астрономічній логарифмічній шкалі, де більші числові значення відповідають темнішому небу, а менші – яскравішому. В інструкції до Sky

Quality Meter прямо зазначено, що це логарифмічний показник: різниця в 1 зоряну величину відповідає зміні потоку фотонів у 2,512 рази, а різниця у 5 magnitudes означає зміну вже у 100 разів [47]. Саме тому читання SQM не слід тлумачити лінійно: невелика зміна в $\text{mag}/\text{arcsec}^2$ може означати дуже відчутну зміну реальної кількості світла.

SQM описують як один із актуальних радіометричних приладів для моніторингу night sky brightness (NSB). Дослідники підкреслили, що SQM працює у спектральному діапазоні приблизно 375–625 нм, тобто в межах, близьких до візуальної чутливості, а його результати подаються саме в $\text{mag}/\text{arcsec}^2$. Інші уточнюють, що SQM – це прилад для вимірювання яскравості нічного неба в magnitudes per square arcsecond, а його кутова чутливість охоплює широку ділянку неба, що робить вимірювання репрезентативним для зенітного фону, але не для вузької точки [15, с.516].

Фізичний зміст цього показника полягає в оцінюванні світлового фону неба, а не в реєстрації окремого джерела. У технічному описі SQM зазначено, що прилад дає середню яскравість нічного неба, зважену за його кутовою чутливістю в межах широкої зони прийому; через це показник є усередненням по сектору неба, а не миттєвим значенням в одній геометрично точній точці [33]. Тому SQM слід інтерпретувати як індикатор небесного фону над місцем спостереження, а не як пряме вимірювання локальної яскравості окремого об'єкта або поверхні.

Звідси випливає важлива методична відмінність між «яскравістю неба в точці» та «світінням території». Перше – це локальне фотометричне значення, яке SQM реєструє в напрямку зеніту або в межах своєї приймальної діаграми; друге – це просторово розподілене явище, тобто світіння всієї території, яке формується сукупністю джерел, розсіюванням в атмосфері та просторовою неоднорідністю забудови. Дослідження з поєднання SQM і дистанційного зондування показало, що локальні карти NSB відображають суттєві регіональні відмінності, а супутникові продукти при цьому можуть недооцінювати підсилення небесної яскравості, спричинене далеким розсіюванням світла [49,

с.1332]. Отже, «світіння території» є ширшим просторовим феноменом, ніж точкове значення SQM.

На величину SQM-читань істотно впливають атмосферні умови. Зміни аерозольної оптичної товщини та прозорості атмосфери здатні помітно змінювати значення NSB; у дослідженні авторами встановлено, що значна частка варіації може пояснюватися саме атмосферними змінами, а не лише станом приладу [15, с.516]. Це узгоджується з сучасними моделями *skyglow*, де штучне світло, підняте в атмосферу, розсіюється на аерозолях, пилу, краплях води та інших середовищах, формуючи видиму яскравість неба.

Окремо слід враховувати хмарність. Хмари викликають помітні та швидкі коливання SQM-сигналу, тобто крива яскравості стає «нерівною» саме через проходження хмар. В хмарні ночі показник сильно змінюється в часі, а для надійної інтерпретації даних потрібне відокремлення хмарних епізодів від плавних змін, пов'язаних із добовою геометрією неба [37, с.1280]. Це означає, що хмарність не є випадковим шумом, а один із головних модифікаторів нічної яскравості.

Місячне освітлення також суттєво впливає на фізичний зміст SQM-даних. Місячне світло значно підвищує яскравість нічного неба, особливо під час повного Місяця; автори навіть моделюють різний поріг для визначення ясних і хмарних умов залежно від фаз Місяця [37, с.1281]. Отже, при аналізі SQM-рядової інформації необхідно окремо враховувати фазу Місяця, висоту його над горизонтом і взаємодію місячного світла з хмарністю, оскільки саме ця комбінація може різко змінювати показання приладу.

Не менш важливими є локальні джерела світла та геометрія їхнього розташування. Для змістовного вимірювання на сенсор не повинно падати пряме світло від наземного джерела; інакше показник втрачає репрезентативність як характеристика нічного неба. Локальні екологічні та антропогенні чинники формують суттєві регіональні відмінності NSB, а світлове забруднення в міських районах поширюється через розсіювання на передмісті й далі в навколишній простір [47]. Тому місце вимірювання,

екранування від прямих джерел та стабільність навколишнього середовища мають вирішальне значення.

З методичного погляду SQM є корисним саме тому, що дозволяє вловлювати різницю між локальним небесним фоном, атмосферною прозорістю та впливом штучного освітлення. Однак сам прилад вимірює не «територію» як таку, а сумарну яскравість світлового поля в межах своєї оптичної діаграми. У технічному описі SQM наголошено, що його показник є середнім по широкому куту прийому, тоді як у сучасній літературі підкреслюється, що супутникові карти й локальні наземні вимірювання фіксують різні аспекти одного явища [47]. Саме тому «яскравість неба в точці» слід розуміти як локальний фотометричний зріз, а «світіння території» – як просторово інтегровану характеристику регіону.

У практиці польового моніторингу це означає, що коректна інтерпретація SQM-даних потребує одночасного урахування атмосфери, хмарності, місячної фази, висоти Місяця, аерозольного стану повітря, наявності локальних світильників і положення приладу відносно горизонту [15, с.516]. Саме сукупність цих чинників визначає, чи відображає конкретне значення справжню темряву нічного неба, чи короточасний ефект погодних і локальних умов. У цьому сенсі SQM є не просто датчиком, а інструментом фізично обґрунтованого порівняння нічного світлового середовища в часі та просторі.

Отже, фотометричні вимірювання яскравості нічного неба за допомогою SQM є надійним інструментом кількісної оцінки світлового забруднення, однак їх інтерпретація потребує глибокого розуміння фізичної природи вимірюваного сигналу. Показник $\text{mag}/\text{arcsec}^2$ відображає логарифмічну характеристику інтегрального світлового фону неба, а не лінійну інтенсивність випромінювання, що зумовлює необхідність обережного трактування навіть незначних змін значень. Водночас SQM фіксує усереднену яскравість у межах широкої кутової діаграми, тому його дані слід розглядати як локальний фотометричний зріз небесного фону, а не як повну характеристику світіння території.

2.2. Прилади Sky Quality Meter: принцип роботи, типи та метрологічні характеристики

Прилади серії Sky Quality Meter (SQM) належать до найуживаніших інструментів наземної фотометрії нічного неба, оскільки вони дають змогу безпосередньо вимірювати яскравість нічного фону в одиницях mag/arcsec^2 і використовуються як для одноразових польових спостережень, так і для тривалого моніторингу світлового забруднення. У документації виробника підкреслюється, що ці прилади застосовують для порівняння яскравості неба на різних астрономічних майданчиках, для відстеження еволюції світлового забруднення та для побудови довготривалих рядів спостережень «ніч-до-ночі» і «рік-до-року» [43; 44] (табл.2.1).

Таблиця.2.1

Основні типи приладів Sky Quality Meter та їхні характеристики

Модель SQM	Особливості конструкції	Тип підключення	Основне призначення	Особливості поля зору
SQM	Базова модель без лінзи	Автономний ручний режим	Загальні польові вимірювання	Широке поле зору ($\sim 42^\circ$ HWHM), висока чутливість до бокової засвітки
SQM-L	Модель із лінзою	Автономний ручний режим	Точніші вимірювання нічного неба	Вужче поле зору ($\sim 10^\circ$ HWHM; $\sim 20^\circ$ FWHM)
SQM-LU	SQM-L з USB-інтерфейсом	USB	Напівавтоматизований збір серій даних	Такі самі оптичні характеристики, як у SQM-L
SQM-LE	Мережева Ethernet-версія	Ethernet	Безперервний дистанційний моніторинг	Оптична схема SQM-L
SQM-LU-DL	USB + data logger	USB автономне логування	Довготривалий автономний моніторинг	Оптична схема SQM-L

Джерело: складено автором на основі [41; 42; 43; 44; 45; 46]

Принцип дії SQM ґрунтується на реєстрації інтегрального світлового потоку, який надходить у фото-чутливий елемент у межах його кутової чутливості. Прилад не «бачить» окрему точку неба в геометрично вузькому сенсі, а вимірює усереднену яскравість у межах свого поля зору, тобто формує

зважає на значення для частини небесного склепіння [41]. Це важливо для інтерпретації: значення SQM відображає не локальне джерело світла, а сумарний небесний фон, на який впливають атмосфера, розсіювання та розподіл штучного освітлення в просторі. Сам виробник прямо зазначає, що читання є показником яскравості неба в межах поля зору приладу, а в науковій літературі це формулюють як усереднену оцінку нічного неба.

Найважливіша метрологічна характеристика SQM пов'язана з його полем зору. Для моделей з лінзою, насамперед SQM-L та його похідних, у технічних матеріалах виробника наведено половинну ширину на півмаксимумі приблизно 10° , а повну ширину на півмаксимумі приблизно 20° . Водночас у FAQ виробник прямо порівнює класичний SQM і SQM-L: для SQM-L поле зору істотно вужче, тоді як у базового SQM воно значно ширше, орієнтовно близько 42° за показником HWHM, що робить його більш чутливим до світла з горизонту та бічних напрямків [47]. Отже, вибір модифікації безпосередньо впливає на те, наскільки сильно на результат діятимуть ліхтарі, будівлі, дерева або інші перешкоди в околиці точки спостереження.

Саме поле зору зумовлює різні наслідки застосування приладу. Для SQM-L вужча діаграма чутливості зменшує вплив сторонніх джерел світла та робить прилад придатнішим для темних майданчиків, а також для порівнянь на відкритих ділянках із мінімальною локальною за світлою [48]. Для базового SQM ширше поле зору може бути перевагою в деяких оглядових вимірюваннях, але в урбанізованому або приміському середовищі воно підвищує ризик домішування світла з боків. У матеріалах виробника прямо вказано, що SQM-L краще підходить для астрономічних спостережень саме тому, що його лінза звужує прийом світла й зменшує вплив ліхтарів, будівель і дерев.

Окрему групу становлять модифікації SQM, які відрізняються способом підключення, накопичення даних та придатністю до безперервного моніторингу. Класичний SQM-L є ручним приладом: він призначений для одноразового натискання кнопки, не має зовнішнього порту зв'язку і тому

використовується переважно для польових вимірювань на місці. SQM-LU – це USB-версія, яка підтримує передавання даних до комп’ютера через USB та придатна для напівавтоматизованого збору серій. SQM-LE – Ethernet-версія, розрахована на мережеве підключення й постійне віддалене отримання даних [42; 44]. Нарешті, SQM-LU-DL поєднує USB-зв’язок із функцією data logging, тобто автономного накопичення серій вимірювань. У технічних описах виробника також зазначено, що SQM-LE має ті самі оптичні властивості, що й SQM-L, тобто відмінність між ними полягає не в оптиці, а в способі комунікації та режимі експлуатації.

Для польового застосування принципово важливими є вимоги до експлуатації. SQM слід орієнтувати на зеніт і забезпечувати, щоб у поле зору не потрапляло пряме світло від наземних джерел [48]. У документації наголошується, що будь-яке пряме засвічення або затінення сенсора стороннім джерелом робить показник некоректним; також під час вимірювання треба зберігати незмінну орієнтацію приладу до появи числового значення. У темних умовах вимір може тривати довше, ніж у міських, а прилад накопичує сигнал протягом певного часу, тому стабільність положення є обов’язковою умовою. Окремо виробник застерігає від вимірювань, коли в поле зору потрапляють освітлені об’єкти, Місяць або інші яскраві джерела, бо це штучно знижує значення $\text{mag}/\text{arcsec}^2$ й спотворює інтерпретацію нічної яскравості.

Методично SQM має кілька джерел систематичних відхилень, які необхідно враховувати в роботі. По-перше, прилади одного типу можуть мати відмінності нульової точки та абсолютної чутливості. У технічних матеріалах виробника для SQM-LU та SQM-LE зазначено, що прилади фабрично калібруються, а абсолютна точність оцінюється приблизно на рівні $\pm 10\%$ або близько $\pm 0,10 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$; різниця між нульовими точками між відкаліброваними приладами також зазвичай становить близько $\pm 10\%$ або $\pm 0,10 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$ [41]. По-друге, форма кутової характеристики може відрізнятися від зразка до зразка: експериментальна перевірка показала, що фактичне поле зору може бути ширшим, ніж очікується, а розподіл чутливості іноді має подвійний

пiк, пов'язаний iз неiдеальним вирiвнюванням оптики. Це означає, що для строгих порiвнянь бажано не обмежуватися паспортними даними, а враховувати реальну кутову вiдповiдь конкретного екземпляра.

До систематичних похибок також належать спектральна невiдповiднiсть, вплив покривних елементiв i змiненi умови установки. SQM вимiрює не «взагалi свiтло», а свiтло в межах власної спектральної чутливостi та оптичної схеми; через це результати можуть по-рiзному реагувати на джерела з рiзним спектром, особливо при переходi до свiтлодiодного освiтлення. У мануалах виробника окремо зазначено, що для деяких моделей причинами повторного калiбрування можуть бути змiна корпусу або захисного покриття, старiння пластикового купола, заміна лiнзи або змiна поля зору [41]. Водночас пiдкреслено, що в польових умовах виконати повноцiнне перекалiбрування складно, тому для вiдповiдальних серiй рекомендується заводська або лабораторна перевiрка. Для практичного дослiдження це означає, що кожна змiна оптики, захисного скла чи монтажноi схеми потребує повторного контролю нульової точки.

Питання повторюваностi та довготривалої стабiльностi є ключовим для побудови трендiв. Дослiдження мережi з дев'яти SQM у Нiдерландах показало, що рiчна стабiльнiсть iнтеркалiбрацiї забезпечує стандартне вiдхилення близько 5% для медiанної яскравостi, а для крайнiх перцентилiв – приблизно 8% i 4%. Автори зробили висновок, що такi показники є достатнiми для виявлення змiн яскравостi, бiльших за 5%, у мiських i промислових умовах [39]. Це дуже важливо для iнтерпретацiї довгих рядiв: якщо змiна менша за межi рiчної стабiльностi, її не можна беззастережно трактувати як реальне покращення чи погiршення нiчного неба.

Для довготривалих серiй SQM-даних особливе значення мають регулярнiсть, однаковий протокол i фiксацiя метаданих. У технiчних джерелах виробника наголошено, що сенсорна система потребує стабiльної орієнтацiї, а режим роботи, час накопичення, тип пiдключення та параметри середовища повиннi бути вiдомi й однаковi в межах серiї. У мережевих моделях це означає

необхідність однакового часу вимірювання, однакових критеріїв відбору ночей, однакової схеми перевірки та, бажано, використання одного й того самого приладу або приладів, які пройшли спільну інтеркалібрацію [44]. Саме тому SQM доцільно розглядати не як разовий «датчик темряви», а як інструмент серійного моніторингу, у якому цінність результату зростає разом із тривалістю спостережень і якістю калібрувального контролю.

Отже, прилади Sky Quality Meter поєднують простоту польового використання з достатньою метрологічною чутливістю для дослідження світлового забруднення, але коректність їхніх даних залежить від розуміння поля зору, конструкції модифікації, режиму експлуатації та регулярної перевірки. Для локальної оцінки світлового забруднення найкраще працюють моделі з більш вузьким полем зору, а для безперервного моніторингу – мережеві версії.

2.3. Методика організації SQM-моніторингу: протокол вимірювань, контроль якості й невизначеність

Методика SQM-моніторингу має будуватися як повторюваний і прозоро описаний протокол, оскільки саме якість організації спостережень визначає, чи буде отримане значення придатним для порівняння в часі та просторі (табл.2.2).

У сучасній літературі підкреслюється, що для оцінювання нічної яскравості використовують як поодинокі наземні вимірювання, так і мережі приладів, а також що метою таких спостережень часто є формування базової лінії умов нічного неба, простеження трендів світлового забруднення та перевірка ефективності заходів із зовнішнього освітлення [13]. Водночас оглядові праці наголошують: без чіткого контролю умов спостереження та метаданих результати легко змішуються з атмосферними й технічними чинниками [7; 14].

Таблиця 2.2

Основні елементи методики SQM-моніторингу світлового забруднення

Компонент методики	Основний зміст	Практичне значення
Вибір точок спостереження	Відбір репрезентативних локацій у межах міста, передмістя, сільських і природоохоронних територій	Дає змогу порівнювати просторові відмінності рівня світлового забруднення
Орієнтація приладу	Наведення SQM у зеніт та уникнення прямого потрапляння світла на сенсор	Забезпечує коректність вимірювання яскравості небесного фону
Час проведення вимірювань	Спостереження після завершення астрономічних сутінок і до світанку	Мінімізує вплив сонячного світла та підвищує порівнянність даних
Контроль погодних умов	Урахування хмарності, прозорості атмосфери, вологості та аерозольного стану	Дозволяє відокремити атмосферний вплив від реального рівня світлового забруднення
Урахування місячного освітлення	Фіксація фази Місяця та його висоти над горизонтом	Дає змогу уникнути завищення яскравості нічного неба
Повторність спостережень	Проведення кількох вимірювань у точці та повторних серій у часі	Підвищує статистичну надійність результатів
Фіксація метаданих	Запис координат, часу, типу місцевості, моделі приладу та умов спостереження	Забезпечує можливість перевірки та подальшого порівняння результатів
Контроль якості даних	Відбракування вимірів із засліпленням, хмарністю або технічними помилками	Зменшує ризик хибної інтерпретації
Калібрування та перевірка приладів	Періодичний контроль стабільності показань SQM	Підтримує довготривалу порівнянність даних
Інтерпретація результатів	Аналіз значень з урахуванням погодних, спектральних і локальних чинників	Дозволяє оцінювати реальний рівень світлового забруднення

Джерело: складено автором на основі [7; 13; 14; 36]

Вибір точок вимірювання доцільно здійснювати так, щоб охопити різні типи місцевості: міське середовище, передмістя, сільські території та природоохоронні зони. Така стратифікація дає змогу порівнювати не лише абсолютні рівні яскравості, а й просторову градієнтність антропогенного впливу від щільно забудованих зон до територій, де збереження темряви є екологічною цінністю [36]. У звіті ЕЕА світлове забруднення розглядається як фактор, що особливо змінює «темні простори» й природні середовища для світлочутливих видів, а в довготривалих дослідженнях SQM регулярно

порівнюють саме rural, intermediate та urban sites [13]. Отже, для дослідження логічно брати репрезентативні точки в межах кожної з цих чотирьох категорій і фіксувати їхню функціональну роль у ландшафті.

Для міських точок бажано обирати місця, де прилад не потрапляє у пряме світло від ліхтарів, рекламних екранів, фасадної підсвітки чи транспортних потоків, але водночас точка відображає реальний фон засвічення над міською територією [7].

Для передмість і сіл важливо уникати локальних «точкових» джерел, які можуть штучно підняти чи знизити показник, наприклад світла подвір'я, теплиць, ферм, автодоріг або окремих прожекторів [14].

Для природоохоронних територій головним критерієм є віддаленість від місцевих джерел світла і можливість оцінити саме вплив skyglow, тобто далекого розсіювання світла від міст і інфраструктури. У підходах до моніторингу нічної яскравості підкреслюється, що щільність і розташування пунктів спостережень мають відповідати завданню картографування; як правило, для грубої просторової оцінки достатньо невеликої густоти мережі, але для тонкої локалізації змін потрібне суттєво щільніше покриття [13].

Регламент вимірювань має бути однаковим для всіх точок. Базове правило – орієнтація SQM строго в зеніт і збереження положення приладу до завершення вимірювання. В інструкції виробника прямо зазначено, що під час вимірювання не повинно бути прямого підсвічування або затінення сенсора наземним джерелом, а в дуже темних умовах прилад може набирати сигнал довше, ніж у міському середовищі; тому орієнтацію слід утримувати незмінною до появи результату [47; 48]. Для польового протоколу це означає, що кожна серія має виконуватися однаково: в один і той самий часовий інтервал, за однакової техніки наведення, з однаковою тривалістю фіксації, щоб зменшити вплив оператора на результат.

Найбільш коректним часовим вікном для SQM-моніторингу є нічний період після завершення астрономічних сутінок і до початку ранкових сутінків, коли Сонце не впливає безпосередньо на нічне небо [7]. Саме в цей час

яскравість зеніту визначається комбінацією штучного освітлення, повітряного світіння, хмарності, місячної фази та оптичних властивостей атмосфери. Оглядові праці показують, що навіть у межах однієї ночі яскравість може помітно змінюватися через хмари, а місячне світло суттєво підсилює показники, тому для порівнянь необхідно відбирати або коригувати ночі з урахуванням Місяця і хмарності. У довготривалих дослідженнях SQM-записів саме фільтрація за moon- і clear-sky conditions є стандартною частиною обробки даних [36].

До обов'язкових даних слід відносити точні координати точки, висоту над рівнем моря, тип місцевості, дату й час спостереження, фазу та висоту Місяця, стан неба, наявність хмарності, температуру повітря, за можливості – вологість, прозорість атмосфери, характер локального освітлення і модель приладу [14]. Це необхідно, бо на SQM-значення впливають не лише штучні джерела світла, а й аерозольний стан атмосфери, сезонні зміни, хмарність, місячне освітлення та навіть вікові зміни самого приладу. Окремі дослідження показують, що значна частка варіації нічної яскравості може пояснюватися саме атмосферними умовами, а не зміною світлового навантаження [38, с.2968], тому без метаданих результати легко інтерпретувати хибно.

Повторюваність вимірювань доцільно забезпечувати через серії з кількох послідовних зчитувань у кожній точці та через повторні відвідування тієї самої локації в однакових умовах. Для практичного аналізу корисно брати не одне значення, а набір спостережень, з яких далі обчислювати медіану, розмах або середнє за відбракуванням аномальних значень. Саме така логіка відповідає сучасним підходам до моніторингу: SQM-мережі застосовують для довготривалих трендів, а не для одиничного виміру, і значущими є саме стійкі відмінності між серіями, а не дрібні коливання, що можуть укладатися у приладову або атмосферну змінність. У нідерландському дослідженні мережі SQM річна невизначеність становила близько 5% для медіанного значення, що задає орієнтир: зміни менші за цей рівень слід тлумачити обережно [39].

Контроль якості повинен включати відбракування вимірів, виконаних за явного прямого засвічення, за підсвічування сенсора, під час суттєвої хмарності, яка не дозволяє порівнювати ніч із ніччю без додаткової корекції, а також у періоди, коли Місяць перебуває над горизонтом і прямо впливає на яскравість неба. У літературі підкреслюється, що хмари можуть як затемнювати небо в малозасвічених місцях, так і різко підсилювати світіння в урбанізованих територіях; місячна фаза й висота Місяця теж змінюють NSB настільки помітно, що ночі з різними фазами не можна безумовно зводити до однієї вибірки [7]. Тому критерій фільтрації має бути подвійним: по-перше, видаляти технічно некоректні записи; по-друге, окремо маркувати фізично різні умови спостереження, а не змішувати їх в одну серію.

Окремо треба враховувати вікові та приладові зміщення. У технічній документації виробника зазначено, що SQM є фабрично відкаліброваним приладом, але з часом може вимагати перевірки через зміну корпусу, покриття, лінзи або інших елементів; у довготривалих дослідженнях також показано, що ageing-ефект і атмосферні зміни можуть разом зумовлювати повільний дрейф вимірів [41]. Це означає, що будь-який тренд у даних слід інтерпретувати лише після розділення трьох складових: реальної зміни яскравості неба, змін атмосфери і потенційного дрейфу приладу. Для цього використовують повторні контрольні вимірювання, співставлення з еталонними ночами, а за наявності мережі – порівняння приладів.

Підхід до інтерпретації результатів має бути обережним і багатофакторним. Значення SQM у mag/arcsec^2 є логарифмічним: менше число означає яскравіше небо, а більше – темніше; отже, невелика різниця в показниках може відповідати суттєвій зміні реального світлового фону. Крім того, SQM реєструє не «світлове забруднення взагалі», а усереднену яскравість у межах власного поля зору, тому на показник впливають геометрія місця, спектральний склад джерел, наявність хмар, повітряне світіння, місячне освітлення, сезон, аерозолі та навіть альbedo поверхні. У сучасних оглядах окремо наголошується, що спектральна чутливість SQM взаємодіє зі спектром

штучного світла, особливо в умовах поширення LED-освітлення [47], тому порівняння між територіями з різними джерелами світла слід проводити з урахуванням цієї невідповідності.

Отже, методика SQM-моніторингу повинна поєднувати стратифікований відбір точок, єдиний нічний регламент, контроль прямого світла, обов'язкову фіксацію метаданих, фільтрацію за погодними й астрономічними умовами, а також окремий облік приладових зсувів і невизначеності. Лише за таких умов SQM-дані можна використовувати як надійну основу для локальної оцінки світлового забруднення, порівняння міста, передмістя, села та природоохоронних зон і побудови подальших карт і трендів.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ SQM-ОЦІНЮВАННЯ СВІТЛОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ

3.1. Порівняльна SQM-оцінка для країн Європейського Союзу

Порівняння світлового забруднення країн Європейського Союзу доцільно будувати не на загальних візуальних враженнях, а на інструментальних наземних вимірюваннях нічної яскравості неба, поданих у шкалі mag/arcsec^2 . Саме ця одиниця є базовою для SQM-вимірювань: чим більше значення, тим темнішим є небо, а отже тим менший рівень світлового забруднення. У літературі підкреслюється, що для темного, майже незабрудненого неба характерні значення близько $21.4\text{--}22.0 \text{ mag/arcsec}^2$, тоді як для щільно урбанізованих територій типовими є значення приблизно $14\text{--}16 \text{ mag/arcsec}^2$. Globe at Night як відкрита платформа громадянської науки дає змогу працювати з картою спостережень і даними у форматі CSV, що робить цей ресурс придатним для зіставлення територій за однаковими правилами відбору SQM-записів [13; 22].

У загальноєвропейському контексті вихідна ситуація є несприятливою: ще світовий атлас штучної яскравості нічного неба показав, що понад 99% населення Європи живе під засвіченим небом. Європейський звіт ЕТС НЕ також фіксує, що територія Європи загалом зазнала чистого зростання антропогенного нічного освітлення, причому особливо виразно це проявилось в східних регіонах. У тому ж звіті наголошено, що в ЄС немає спільної єдиної політики щодо світлового забруднення, а національні підходи суттєво різняться: Франція, Хорватія, Словенія та Чехія мають прогресивніші правові рамки, тоді як в окремих країнах діють лише рекомендації [13]. Це означає, що країни ЄС порівнюються не в “нульовому” середовищі, а в дуже нерівномірному полі природних, урбаністичних і нормативних чинників.

Якщо подивитися саме на зіставлення країн за динамікою яскравості, то звіт ЕТС НЕ показує найбільше зростання в Нідерландах, Люксембурзі, Польщі

та Бельгії в порівнянні періодів 2014/15 і 2020/21 [13]. Це дуже важливий результат, бо він свідчить не лише про високий стартовий рівень засвічення, а й про те, що подальший тиск на нічне середовище в цих державах продовжував посилюватися. Для Нідерландів така ситуація особливо показова: у європейських ранжуваннях саме там зафіксовано одну з найяскравіших територій – Delft en Westland, де нічне небо є надзвичайно засвіченим, зокрема через значний внесок тепличного господарства та щільної інфраструктури. Отже, Нідерланди, Бельгія, Люксембург і Польща формують групу країн, де високий рівень урбанізації та інтенсивне землекористування поєднуються з подальшим наростанням нічної яскравості.

На протилежному боці європейського порівняння опиняються країни, для яких у звіті зафіксовано зниження світлового забруднення. Серед них особливо виділяється Франція: у звіті «ЕТС НЕ» прямо зазначено, що для Франції простежується скорочення світлового забруднення, а в описі причин окремо наголошено на її відносно прогресивній правовій базі [13]. Якщо подивитися на найновіший супутниковий аналіз, оприлюднений у 2026 році, то там також повідомляється, що в Європі загалом нічне світло зменшилося приблизно на 4% за період 2014–2022 років, а Франція показала один із найсильніших спадів – близько 33%. Це не SQM-оцінка у вузькому сенсі, але це важливий зовнішній індикатор, який підтверджує, що у Франції динаміка нічного освітлення в останні роки відрізняється від більшої частини континенту.

Окремо варто розглянути країни, для яких найкраще видно просторову нерівномірність. У європейському ранжуванні найтемніших NUTS3-регіонів до першої групи входять території Австрії, Латвії, Литви, Болгарії, Данії, Естонії, Греції, Румунії, Іспанії та Швеції. Це означає, що “темні” зони в ЄС зосереджені переважно не в найбільш урбанізованих державах, а в периферійних, гірських або низькозаселених частинах континенту. Водночас важливо підкреслити: йдеться саме про найкращі регіональні осередки, а не про середній стан усієї країни [19; 33]. Тому навіть у країнах, які в загальному є

доволі засвіченими, можуть існувати окремі осередки відносно темного неба, і навпаки – у “темніших” державах можуть бути яскраво освітлені агломерації.

Найбільш світлового забруднені території Європи також демонструють чітку географічну концентрацію. У списку найгірших 25 забруднених регіонів опинилися території Нідерландів, Франції, Бельгії, Польщі, Румунії, Іспанії та Великої Британії, причому Нідерланди представлені особливо помітно [15; 20]. Це показує, що найбільша яскравість неба в Європі пов’язана не лише з великими столицями, а й з інтенсивно освоєними промисловими, агломераційними та аграрно-тепличними зонами. Для порівняльної характеристики країн це означає, що Бельгія, Нідерланди, Франція, Польща та Іспанія мають не просто локальні проблемні точки, а стійкі територіальні осередки надмірного освітлення, які формують загальний негативний фон.

Якщо доповнити SQM-порівняння ще одним показником – світловим потоком на душу населення, – то картина стає ще виразнішою. У праці, де порівнювали європейські NUTS-регіони, зазначено, що Німеччина в середньому має приблизно вдвічі менший світловий потік на душу населення, ніж решта Європи, а Велика Британія має другий найкращий середній показник у Європі; Франція розташовується трохи вище за середньоєвропейський рівень, а Іспанія та Італія мають значно вищі показники, ніж решта країн ЄС [13; 18; 29]. Хоча це не прямий SQM-показник, він добре пояснює, чому саме в південних і західних країнах ЄС часто спостерігається більш інтенсивне нічне освітлення: висока щільність забудови, транспортна інфраструктура, більша частка освітлених міських просторів і ширша зона розсіювання світла роблять їх більш проблемними в екологічному сенсі.

Цікавим є й те, що в тому ж європейському аналізі найкращі позиції за “екстремально темними” територіями отримали регіони Шотландії, а також окремі провінції Австрії, Латвії, Литви, Болгарії та Скандинавії. Для ЄС це означає наявність двох протилежних полюсів: з одного боку – великі агломерації, транспортні коридори та теплично-індустріальні зони; з іншого – слабо заселені, географічно ізольовані або природоохоронні регіони з набагато

кращим станом нічного середовища [1; 19]. Саме тому країни ЄС не можна порівнювати лише за “середньою яскравістю”: у межах однієї держави різниця між урбанізованими та периферійними зонами може бути настільки великою, що середнє значення приховує реальний просторовий контраст.

Додатково європейський звіт «ETC NE» прямо показує, що за період 2014/15–2020/21 найбільше зростання яскравості відбулося саме в Нідерландах, Люксембурзі, Польщі та Бельгії, тоді як у Франції спостерігалось зменшення світлового забруднення. Це дає змогу виділити в межах ЄС щонайменше три аналітичні групи [16]. До першої належать країни з найшвидшим погіршенням нічного середовища – Нідерланди, Люксембург, Польща, Бельгія. До другої – країни з відносно стабільним або помірно змінним станом, де підсумковий баланс не такий різкий, але локально існують яскраві міські ядра; сюди за функціональною логікою можна віднести значну частину Центральної та Південної Європи. До третьої групи належить Франція як приклад країни, де останнім часом було зафіксовано спад. Така трирівнева структура є значно змістовнішою за простий список місць, тому що відображає не тільки рівень засвічення, а й динаміку змін.

На рівні інтерпретації важливо зробити ще один висновок: SQM-значення в ЄС слід читати не ізольовано, а у зв’язку з типом території. Там, де переважають міські та приміські точки, нічне небо буде закономірно яскравішим; там, де є більша частка природоохоронних або сільських спостережень, значення будуть вищими, тобто темнішими. Саме тому при порівнянні країн найадекватніше використовувати не лише середнє, а медіану, розмах і частку спостережень у найтемніших діапазонах [22]. Таке читання узгоджується і з самою природою шкали $\text{mag}/\text{arcsec}^2$, і з європейськими дослідженнями, де підкреслено, що атмосферні умови, хмарність, астрономічні параметри та міська структура істотно впливають на нічну яскравість.

Таблиця 3.1

Порівняльна характеристика світлового забруднення окремих країн ЄС за результатами SQM- та супутникових оцінок

Країна	Загальна характеристика нічного неба	Особливості світлового забруднення	Загальна тенденція	Орієнтовне положення у порівнянні
Нідерланди	Дуже яскраве нічне небо	Висока щільність забудови, тепличні комплекси, інтенсивна транспортна мережа	Зростання яскравості	Одна з найбільш засвічених країн ЄС
Бельгія	Високий рівень засвічення	Суцільна урбанізована структура та висока концентрація освітлення	Подальше посилення	Дуже високий рівень світлового забруднення
Польща	Помітне збільшення нічної яскравості	Активна урбанізація та розширення інфраструктури	Суттєве зростання	Високий рівень забруднення у міських регіонах
Франція	Контрастне просторове розміщення	Великі міські агломерації поєднуються з темнішими периферійними зонами	Часткове зменшення	Середній рівень із вираженими контрастами
Іспанія	Нерівномірна структура засвічення	Яскраві туристичні та прибережні регіони при наявності темних внутрішніх територій	Помірне зростання	Від середнього до високого
Італія	Висока урбанізація північних регіонів	Значна концентрація освітлення в індустріальних зонах	Стабільно високий рівень	Високий рівень світлового забруднення
Німеччина	Помірний середній рівень	Більш ефективне використання освітлення у частині регіонів	Відносна стабільність	Середній рівень
Швеція	Відносно темне нічне небо	Велика частка малозаселених територій	Стабільний стан	Одна з найтемніших країн ЄС
Естонія	Низька середня яскравість	Значна частка природних та периферійних територій	Відносна стабільність	Низький рівень світлового забруднення
Латвія	Переважно темне небо	Невисока щільність населення та урбанізації	Стабільний стан	Низький рівень засвічення
Литва	Відносно темне нічне середовище	Менша концентрація великих агломерацій	Помірна стабільність	Низький–середній рівень

Джерело: складено автором на основі [18; 28; 45; 46].

Отже, порівняльна SQM-картина країн Європейського Союзу виглядає як поєднання кількох чітких географічних і соціально-економічних закономірностей. Найбільш світлового навантажені держави та регіони тяжіють до щільно урбанізованих і господарсько інтенсивних територій Західної та частково Центральної Європи, насамперед Нідерландів, Бельгії, Люксембургу, Польщі та окремих зон Франції, Італії й Іспанії. Водночас темніші осередки зберігаються у віддалених, гірських або малозаселених регіонах Австрії, Латвії, Литви, Болгарії, Данії, Естонії, Греції, Румунії, Іспанії та Швеції. Саме тому коректніше говорити не про один “найкращий” або “найгірший” показник для всієї країни, а про різну ступінь засвічення просторових типів територій усередині ЄС.

3.2. SQM-оцінка світлового забруднення в Україні

SQM-оцінка світлового забруднення в Україні дає змогу розглядати нічне середовище не як абстрактну сукупність «освітлених» і «темних» територій, а як систему локальних спостережень, кожне з яких має конкретну просторову, часову та метеорологічну прив’язку. У межах Globe at Night базовим індикатором виступає Limiting Magnitude: чим вищим є цей показник, тим темніше небо і тим слабше проявляється світлове забруднення; навпаки, нижчі значення вказують на яскравіший небесний фон. Саме тому дані цього типу придатні не для «середнього по країні», а для локальної екологічної діагностики окремих територій.

Методично важливо, що Україна у відкритому масиві Globe at Night представлена не суцільною сіткою вимірювань, а окремими точками, розкиданими в різні роки та в різних місцях. Це означає, що кожний запис треба читати як окремий нічний епізод, а не як репрезентативну картину всієї області чи держави. У такій спосіб головне не чисельне усереднення, а

змістовне зіставлення точок за LM, координатами, висотою, хмарністю та роком спостереження.

Одним із прикладів є запис за 2009 рік, який у картці спостереження має координати 50.4633; 30.6317, значення $LM = 3$ та позначку про місце спостереження в парку “Kioto”. За цими координатами й контекстом це спостереження пов’язується з Києвом, тобто з найбільш урбанізованою та світлово навантаженою частиною країни. Для такого типу території низьке значення *limiting magnitude* є закономірним, оскільки велика щільність забудови, транспортної інфраструктури, рекламного та декоративного освітлення формує інтенсивний фон нічного світіння. Київ як місто зі спеціальним статусом є окремим адміністративним центром, розташованим на координатах приблизно 50°24’08.64” N, 30°31’56.64” E.

Такий київський запис важливий не лише сам по собі, а й як еталонний урбанізований випадок. $LM = 3$ означає, що спостерігач бачив не так багато слабких зір, а отже нічний фон уже був помітно засвіченим. Це відповідає столиці, де висока концентрація штучного освітлення, щільний міський контур і значна кількість локальних джерел світла знижують природну темність неба. У межах екологічного аналізу це вказує на стійкий урбанізований тиск, який має враховуватися при плануванні зовнішнього освітлення, зонуванні вуличного світла та впровадженні нічних режимів енергозбереження.

Наступний приклад – запис 2014 року з координатами 51.2722; 30.2242 та $LM = 7$. За географічним положенням ця точка відноситься до Чернігівської області, адміністративний центр якої знаходиться на півночі України, поблизу кордону з Білоруссю та в зоні порівняно меншої урбанізаційної щільності, ніж столичний регіон. Чернігівська область має координати приблизно 51°22’21.36” N, 31°59’31.92” E, що узгоджується з тим, що спостережна точка лежить у її межах або безпосередній близькості.

Значення $LM = 7$ для цього запису є принципово іншим за змістом, ніж київське $LM = 3$. Воно означає значно темніше небо, тобто суттєво менший рівень штучного засвічення. У науковому сенсі це свідчить про кращу

збереженість природної нічної темряви, що є характерним для менш урбанізованих і менш освітлених ділянок. Для Чернігівської області така різниця є важливою, оскільки показує, що навіть у межах однієї країни світлове забруднення розподілене дуже нерівномірно: столична агломерація й периферійні північні території формують різні типи нічного середовища.

Ще один приклад – запис 2022 року з координатами 51.3374; 26.5985 та $LM = 4$. За цими координатами точка потрапляє до Рівненської області, яка розташована на північному заході України і має адміністративний центр у місті Рівне; офіційний географічний орієнтир області становить приблизно $50^{\circ}59'17.88''$ N, $26^{\circ}24'33.12''$ E. Це дозволяє кваліфікувати запис як регіональний приклад для Полісся, де поєднуються міські, приміські та лісово-сільські типи територій.

$LM = 4$ у Рівненській області займає проміжне положення між дуже яскраво засвіченим небом столиці та темнішими північними чи західними територіями. У практичному сенсі це означає, що нічне небо тут уже не є настільки чистим, як при $LM = 7$, однак ще не досягає рівня сильного урбанізованого засвічення, характерного для великих міст. Такий проміжний результат є особливо цінним, бо дозволяє побачити перехідну зону між міським і напівприродним світловим режимом. Саме на таких територіях найкраще відслідковувати вплив локальних джерел освітлення, оскільки просторовий градієнт між містом, передмістям і більш відкритими ділянками простежується особливо чітко.

Показовим є запис 2021 року з координатами 49.7689; 27.1589 та $LM = 7$. За географічним положенням ця точка відповідає Хмельницькій області, адміністративний центр якої розташований на координатах близько $49^{\circ}32'04.56''$ N, $27^{\circ}00'55.44''$ E. Тобто спостереження справді потрапляє до регіону, який лежить у західно-центральної частині України та поєднує середньоурбанізовані території з великою часткою сільського ландшафту.

$LM = 7$ у Хмельницькій області свідчить про дуже темне небо і, відповідно, слабе світлове забруднення на місці спостереження. У порівнянні з

київським показником $LM = 3$ це демонструє істотну внутрішню диференціацію території України за рівнем нічного освітлення. Для наукового аналізу це означає, що центральна частина країни не є однорідною: навіть у відносно близьких регіонах одна точка може фіксувати інтенсивне засвічення, а інша – майже природну темряву. Отже, застосування SQM-оцінки тут виявляє саме локальні контрасти, а не «середній стан» регіону.

Наступна локація – запис 2019 року з координатами 49.557; 25.6061 та $LM = 3$, який пов'язується з Тернопільською областю. Тернопільська область має орієнтовні координати 49°23'42.36" N, 25°34'53.40" E, тому ця точка потрапляє в її межі. Такий результат особливо цікавий, бо Тернопільщина часто сприймається як відносно менш урбанізована територія, однак конкретне спостереження демонструє значне засвічення, тобто локальний ефект штучного світла тут може бути сильнішим, ніж очікується з огляду на загальне уявлення про регіон.

$LM = 3$ на Тернопільщині означає, що нічне небо в цій точці було помітно яскравим, а видимість слабких зірок – обмеженою. Це дозволяє припустити наявність або близької урбанізованої зони, або впливу магістралей, промислових майданчиків, щільнішої садибної забудови чи інших джерел штучного світла. Для екологічного аналізу це важливий висновок: навіть у західноукраїнських регіонах, де загальний природний фон часто вважається сприятливішим, локальні осередки засвічення можуть знижувати якість нічного середовища до рівня, співставного з великими містами.

Окремої уваги заслуговує запис 2024 року з координатами 49.020928; 24.343472 та $LM = 6$. За географічним положенням ця точка потрапляє до Івано-Франківської області, офіційний центр якої має координати приблизно 48°38'37.68" N, 24°35'54.24" E. Саме тут спостерігається один із найкращих у межах доступного масиву прикладів темнішого нічного неба в Україні.

$LM = 6$ свідчить про помітно темніше небо, ніж у випадках $LM = 3$ або $LM = 4$, але все ж не про повністю природний, «ідеально темний» фон. Для Івано-Франківської області це особливо важливо, оскільки регіон поєднує

гірські, передгірні та міські території, а отже здатен давати контрастні значення світлового забруднення залежно від конкретної точки. На рівні екологічного планування це означає, що природоохоронні й рекреаційні зони області можуть слугувати референтними територіями для моніторингу темного неба, а міські осередки – контрольними зонами підвищеного освітлювального навантаження.

Окремо слід згадати Чернігівську область ще раз – через запис 2023 року з координатами 51.2763; 30.2218992 та $LM = 7$. Ця точка практично повторює північний регіональний контекст попереднього чернігівського спостереження і підтверджує, що область у межах масиву має тенденцію до фіксації високих значень *limiting magnitude*. Така повторюваність важлива, бо вона зменшує ймовірність випадкового ефекту одного нічного епізоду й натомість вказує на стійкі регіональні умови темнішого неба.

Якщо зіставити всі ці точки, то вимальовується чітка регіональна ієрархія. Найяскравіше небо фіксується в Києві та в окремих локальних точках центральних областей із $LM = 3-4$; темніше небо спостерігається в Чернігівській області та на окремих територіях Івано-Франківщини з $LM = 6-7$; положення займають території на кшталт Рівненщини та Хмельниччини. Отже, у межах України світлове забруднення розподілене нерівномірно й має виразний просторовий градієнт від урбанізованих центрів до менш засвічених периферійних і природно збережених зон.

Однак ці висновки необхідно інтерпретувати обережно. *Globe at Night* є громадянсько-науковою платформою, а отже її дані мають точковий і нерівномірний характер; вони добре придатні для виявлення локальних контрастів, але не для автоматичного обчислення офіційного середнього рівня світлового забруднення по області без додаткової вибірки. Саме тому правильний висновок полягає не в тому, що «одна область темніша за іншу взагалі», а в тому, що в межах конкретних точок і років спостерігаються різні режими нічного освітлення, пов'язані з урбанізацією, інфраструктурою, рельєфом і щільністю джерел штучного світла.

З методичного погляду це робить SQM-аналіз особливо цінним для України. Він дозволяє не просто констатувати наявність світлового забруднення, а виділяти території, де доцільно першочергово впроваджувати екранування світильників, зменшення потужності освітлення, обмеження декоративної підсвітки та нічне зонування освітлювальних режимів. Для Києва та великих урбанізованих центрів це насамперед питання енергоефективності та зменшення надлишкового освітлення; для Чернігівської, Рівненської, Хмельницької, Тернопільської та Івано-Франківської областей – питання збереження темних територій, буферних зон і природних нічних ландшафтів.

У підсумку SQM-оцінка світлового забруднення в Україні за даними Globe at Night показує, що країна не має однорідного нічного світлового режиму. Київська точка з $LM = 3$ фіксує сильне урбанізоване засвічення; Чернігівщина з $LM = 7$ демонструє темніше небо; Рівненщина і Хмельниччина займають проміжні позиції; Тернопільщина в окремому записі також показує високе засвічення, а Івано-Франківщина – відносно сприятливіші умови з $LM = 6$. Усі ці приклади підтверджують головний висновок: світлове забруднення в Україні має локальний, регіонально неоднорідний характер, а отже потребує не загальних декларацій, а точкового екологічного моніторингу та регіонально орієнтованого управління зовнішнім освітленням.

3.3. Практичні рекомендації за результатами SQM-аналізу: модель локального моніторингу та управління зовнішнім освітленням

Отримані в попередньому підрозділі записи Globe at Night показують не суцільну карту України, а мозаїку окремих точок із різним значенням Limiting Magnitude та різними умовами спостереження [19]. Саме ця фрагментарність і визначає прикладний висновок: для реального управління світловим забрудненням потрібен не разовий огляд карти, а повторюваний локальний моніторинг, прив'язаний до одних і тих самих точок, однакової процедури вимірювання та однакового способу фіксації результатів. На рівні громад,

природоохоронних територій і буферних зон біля них ключовим стає не абстрактне «покращення освітлення», а контроль конкретних локацій, де небесний фон системно залишається яскравішим за сусідні ділянки.

Практична модель локального SQM-моніторингу складається з трьох взаємопов'язаних блоків: мережі контрольних пунктів, протоколу вимірювання та системи оцінки ефективності втручань. Мережа пунктів фіксує просторову структуру спостережень; протокол забезпечує відтворюваність даних; система оцінки дає змогу порівнювати стан «до» і «після» управлінських змін. Такий підхід відповідає природі SQM-даних, оскільки показник темності неба є чутливим до локальних джерел світла, висоти точки, погодних умов, місячної фази та часу спостереження. Отже, управлінська модель має будуватися не на одиничному вимірюванні, а на серії повторних замірів у сталих точках.

Таблиця 3.2

Модель локального SQM-моніторингу та управління зовнішнім освітленням

Елемент моделі	Зміст	Практична реалізація	Очікуваний результат
Контрольні точки	Система постійних пунктів спостереження	Центральна частина населеного пункту, периферія, приміська зона, буферна зона біля природоохоронної території, одна еталонна темна точка	Можливість простежити просторовий градієнт засвічення
Частота вимірювань	Регулярність повторних замірів	Один раз на місяць або раз на сезон; додатково після змін у схемі освітлення	Виявлення динаміки світлового фону в часі
Час вимірювання	Уніфікований часовий інтервал	Після настання темної частини доби, в однаковий інтервал часу	Співставлення даних між різними датами
Метеоумови	Облік природних чинників	Без опадів, без туману, з фіксацією хмарності, прозорості неба і місячної фази	Зменшення похибки, пов'язаної з атмосферними умовами
Позиція спостерігача	Однакова геометрія вимірювання	Прилад спрямовується в zenit, без прямого потрапляння локального світла в поле вимірювання	Порівняння результатів між точками
Метадані	Повний опис запису	Дата, час, координати, висота, тип місцевості, джерело світла поблизу, примітки	Можливість перевірки якості даних
Контроль якості	Відсів некоректних замірів	Виключення точок із прямим засліпленням, сильним локальним підсвічуванням або очевидно нестабільними умовами	Надійніший масив для аналізу

Продовження табл.3.2

Аналітичний вихід	Показники для оцінки змін	Медіана, мінімум, максимум, розмах, різниця «до/після», частка темніших точок	Кількісне обґрунтування управлінських рішень
-------------------	---------------------------	---	--

Джерело: авторська розробка

Мінімальна мережа пунктів спостереження має відтворювати просторовий контраст, а не лише показувати один середній стан. Для громади, де світлове забруднення концентрується у центральній частині, достатньо виділити кілька типологічних точок: одну в ядрі забудови, одну на межі щільної забудови, одну в периферійному секторі та одну в місці, де зберігається відносно темніше небо. Якщо поруч розташована природоохоронна територія, до схеми додається буферна зона на межі впливу освітлення. Така побудова дозволяє не тільки побачити, де саме небо яскравіше, а й визначити, куди спрямовувати управлінське втручання.

Частота вимірювань має бути стабільною. Один разовий замір створює лише моментний зріз, а не картину процесу. Повторення вимірювань у тих самих точках дає змогу побачити, чи змінюється нічне середовище після корекції освітлення [19]. Для локального рівня важливими є щонайменше два типи повторів: планові заміри за фіксованим графіком і контрольні заміри після інженерних змін. У першому випадку відстежується фонові динаміка; у другому – ефект конкретного рішення. Саме так відбувається перехід від опису до управління.

Протокол вимірювання задає відтворюваність. У кожному записі мають бути зафіксовані координати, дата, час, висота спостереження, метеоумови, наявність хмарності, місячні умови, а також коротка примітка про локальний контекст. Якщо поблизу є світильники, реклама, фасадна підсвітка, парковка або транспортний вузол, це теж повинно потрапляти до метаданих. Така деталізація не є зайвою: світлове забруднення завжди має локальне джерело або суму джерел, і без опису середовища окремий SQM-запис втрачає частину аналітичної цінності.

Фіксація метеоумов є критичною. Хмарність, прозорість атмосфери та місячне освітлення прямо впливають на показник нічної яскравості. Якщо ці параметри не однакові, різниця між двома вимірюваннями може відображати не зміну освітлення, а зміну природних умов. Тому локальний моніторинг працює лише тоді, коли кожен запис супроводжується однаковим набором обов'язкових даних. Саме вони дають змогу відокремити реальну інтенсивність штучного засвічення від атмосферного шуму.

З погляду управління зовнішнім освітленням, найбільш проблемні ділянки – це місця з концентрацією яскравих точок або з повторювано низькими значеннями темності неба. Такі зони формують «гарячі точки» світлового забруднення. До них належать центральні вулиці, транспортні розв'язки, великі торгові площі, паркувальні території, фасади адміністративних будівель, набережні, спортивні майданчики, об'єкти реклами та декоративної підсвітки. На природоохоронних територіях і в їхніх буферних зонах світловий тиск часто виникає не від суцільного міського освітлення, а від окремих напрямних світильників, під'їзних шляхів, приватних садиб, туристичної інфраструктури або дорожнього освітлення.

У таких точках діє не один універсальний захід, а комбінація кількох рішень. Найбільший ефект дає екранування світильників і повний контроль напрямку світлового потоку. Коли світло спрямоване вниз і не виходить за межі потрібної площі, значно скорочується розсіювання в атмосфері. Наступний інструмент – зниження інтенсивності освітлення там, де надлишкова яскравість не потрібна для безпеки чи функціональності. У нічні години низької активності доцільним стає приглушення світла або часткове його вимкнення. Це особливо результативно для комерційних фасадів, парковок, вітрин, рекламних щитів і декоративних елементів, які не виконують критичної безпекової функції.

Окремим напрямом є обмеження декоративної підсвітки та реклами. Саме ці джерела часто формують помітну частку нічної яскравості в містах, при цьому не забезпечуючи функціонального виграшу для мешканців. Для

територій, що межують із природними масивами, пріоритет має бути ще жорсткішим: там важливі не лише рівень світла, а й його спектральна структура, напрямок і час роботи. У буферних зонах зайва декоративна підсвітка створює помітний світловий ореол, який розширює зону впливу на навколишнє середовище.

Таблиця 3.3

Пріоритетні заходи для зон із підвищеним світловим забрудненням

Тип території	Характер проблеми	Основний захід	Додаткові заходи	Очікуваний ефект
Центр міста	Висока щільність джерел світла	Екранування світильників	Затемнення в нічні години, корекція кута нахилу	Зменшення розсіяного світла в небі
Транспортні вузли	Сильна локальна яскравість	Оптимізація потужності	Таймери, датчики руху, зональне керування	Зниження надлишкового освітлення без втрати функції
Торгові та комерційні зони	Перевищена візуальна яскравість	Обмеження рекламної підсвітки	Нічні режими роботи, скорочення строку підсвітки	Зменшення світлового фону в пізні години
Житлові квартали	Переосвітлення дворів і під'їздів	Корекція інтенсивності	Точкове освітлення замість заливного	Менше засвічення при збереженні безпеки
Буферні зони природоохоронних територій	Розширення ореолу світла	Максимальне екранування	Заборона декоративного світла, обмеження реклами	Збереження темнішого нічного середовища
Рекреаційні території	Перехідний характер використання	Зонування освітлення	Вимкнення частини світильників у низькоактивні години	Утримання темних ділянок для природи та відпочинку

Джерело: авторська розробка

У міських кварталах найбільш відчутним є ефект від переходу від суцільного заливного освітлення до спрямованого локального світла. Там, де раніше однаковою інтенсивністю підсвічувалися фасади, тротуари й внутрішні двори, після корекції світлового потоку різко зменшується небажане розсіювання в небо. Те саме стосується великих відкритих площ: коли

освітлення працює надмірно потужно цілу ніч, воно створює сильне засвічення без пропорційного виграшу в безпеці або зручності. У таких випадках ефективність дає не збільшення кількості джерел, а зменшення їхньої непотрібної активності.

На природоохоронних територіях і поблизу них світлове управління має іншу логіку. Там головним завданням стає не лише зниження яскравості, а збереження темного фону як елемента природного режиму. Освітлення на таких ділянках часто виходить за межі потреб людини і починає впливати на поведінку тварин, орієнтацію комах, ритми нічної активності та загальну якість нічного середовища. У прикладному сенсі це означає, що в буферних зонах потрібні жорсткіші межі для зовнішнього світла, ніж у звичайних житлових кварталах. Якщо зона межує з лісом, заповідним урочищем, прибережною смугою або іншою природною територією, кожен додатковий світильник має бути обґрунтований функціонально.

Після впровадження заходів їхня ефективність вимірюється не описово, а через повторні SQM-спостереження. Саме тут формується контрольний контур «до/після». Для кожної точки порівнюються значення темності неба до втручання та після нього. Якщо медіанний рівень темності зростає, а кількість вимірювань із низьким показником засвічення скорочується, інтервенція дала позитивний ефект. Якщо змін немає або ситуація погіршується, це означає, що захід або не спрацював, або був частковим і не охопив ключові джерела світла.

Таблиця 3.4

**Індикатори повторного контролю ефективності управління зовнішнім
освітленням**

Індикатор	Спосіб обчислення / фіксації	Що показує	Інтерпретація
Медіанне значення SQM	Порівняння медіани до та після втручання	Типовий рівень темності неба	Зростання медіани означає зменшення засвічення
Мінімальне значення SQM	Найнижчий зафіксований показник у серії	Найяскравіший епізод	Скорочення крайніх яскравих значень означає стабілізацію
Міжквартильний розмах	Різниця між Q1 і Q3	Нерівномірність нічного фону	Зменшення розмаху свідчить про вирівнювання ситуації

Продовження табл.3.4

Частка точок із низьким SQM	Питома вага вимірювань у зоні сильного засвічення	Масштаб проблемної території	Зменшення частки означає звуження зони впливу
Різниця «до/після» в контрольних точках	Порівняння однакових локацій	Локальний ефект заходу	Позитивна різниця підтверджує результативність
Стабільність у часі	Повторюваність значень у серії вимірювань	Довготривалий ефект	Менші коливання означають стійке покращення
Контраст між центром і периферією	Порівняння ядра та зовнішніх точок	Просторовий градієнт засвічення	Зменшення контрасту свідчить про ослаблення надлишкового світла в центрі або про збереження темнішої периферії

Джерело: авторська розробка

Важливо, що ці індикатори працюють разом, а не окремо. Один показник може змінитися випадково через погоду або місячну фазу, але серія повторних вимірювань у тих самих точках уже дає надійніший результат. Саме тому локальний моніторинг повинен бути не разовим, а циклічним. Порівняння після корекції освітлення має здійснюватися в ті самі години, за максимально близьких метеоумов і в тих самих контрольних точках. Тільки тоді зміна SQM або limiting magnitude відображає реальний ефект від управлінського рішення.

У прикладному плані така система дає громадам і адміністраціям природоохоронних територій інструмент, який поєднує простоту спостереження і придатність до кількісної перевірки. Не потрібна велика апаратура для кожного вимірювання, але потрібна дисципліна даних: однакова точка, однаковий протокол, однаковий спосіб фіксації. Саме це робить SQM-моніторинг порівнюваним у часі. Відповідно, управління зовнішнім освітленням перестає бути лише архітектурною або естетичною темою і перетворюється на частину екологічного менеджменту.

Узагальнення результатів SQM-аналізу показує три базові пріоритети. Перший – локалізувати найяскравіші ділянки та закріпити за ними стабільні контрольні точки. Другий – зменшити надлишкове світло через екранування, таймери та вимкнення непотрібної підсвітки. Третій – перевіряти ефект за

допомогою повторних вимірювань, а не лише візуального сприйняття. Саме така послідовність робить результат вимірюваним і придатним для порівняння між різними населеними пунктами, громадами та природоохоронними зонами.

Отже SQM-дані можуть бути не лише джерелом опису нічного середовища, а й інструментом управління ним. Якщо виявлено точки з найнижчими значеннями темності неба, вони стають пріоритетними для втручання. Якщо після змін значення темності зростають, це означає реальне поліпшення. Якщо ж показники лишаються на тому самому рівні, схема освітлення не змінена достатньо.

ВИСНОВКИ

Світлове забруднення є специфічною формою антропогенного тиску, що виникає внаслідок надмірного, невинновданого або неправильно спрямованого штучного освітлення вночі. Його прояви охоплюють засвічення неба, порушення природної темряви, розширення світлового ореолу над містами та проникнення світла в території, де воно не є функціонально необхідним. У результаті світлове забруднення виходить за межі суто технічної проблеми освітлення і набуває екологічного значення як чинник зміни нічного середовища.

Екологічні й соціальні наслідки штучного освітлення вночі є багатовимірними та взаємопов'язаними. Для природних систем воно порушує біоритми живих організмів, змінює поведінку тварин, впливає на орієнтацію комах і на нічну активність екосистем. Для людини надмірне нічне освітлення погіршує якість сну, створює візуальний дискомфорт і знижує якість міського середовища. Таким чином, світлове забруднення є не лише екологічною, а й соціальною проблемою, що потребує управлінського реагування.

Оцінювання світлового забруднення спирається на поєднання польових вимірювань, фотометричних показників і дистанційних даних, що дає змогу аналізувати як локальні, так і просторово широкі прояви проблеми. Найбільш надійними для екологічного аналізу є інструментальні вимірювання яскравості нічного неба, доповнені супутниковими спостереженнями та картографічним аналізом. У сукупності ці підходи дозволяють не лише фіксувати рівень засвічення, а й порівнювати території між собою та відстежувати його динаміку.

Фізичні основи фотометричних вимірювань яскравості нічного неба ґрунтуються на визначенні світлового потоку, що надходить від небесного фону до приладу, і на перетворенні цього сигналу в придатну для порівняння величину. Одиниці SQM у mag/arcsec² є зручними для оцінювання темності неба, оскільки прямо відображають інтенсивність фону: вищі значення

відповідають темнішому небу, а нижчі – яскравішому. Це робить SQM придатним інструментом для екологічного моніторингу світлового забруднення.

Прилади Sky Quality Meter є спеціалізованими фотометричними засобами, призначеними для вимірювання нічної яскравості небосхилу в польових умовах. Їхня практична цінність полягає в простоті використання, достатній точності для екологічних досліджень і можливості стандартизувати результати між різними точками спостереження. Завдяки цьому SQM-прилади забезпечують надійну емпіричну основу для просторового аналізу світлового забруднення.

Методика організації SQM-моніторингу має вирішальне значення для якості даних, оскільки лише уніфікований протокол дозволяє порівнювати результати в часі й просторі. Контроль якості, фіксація метеоумов, місячного освітлення, часу спостереження та географічних параметрів зменшують ризик викривлення результатів. Отже, організований моніторинг забезпечує не разове спостереження, а відтворювану систему оцінювання нічного середовища.

Порівняльна SQM-оцінка країн Європейського Союзу показує, що світлове забруднення має виразну просторову нерівномірність і значно залежить від щільності урбанізації, структури поселень та типу територій. Використання записів Globe at Night дозволяє виявити відмінності між державами не як абсолютний рейтинг, а як статистично обмежене порівняння доступної вибірки. Такий підхід є науково коректним, оскільки враховує нерівномірність даних і не перебільшує репрезентативність окремих спостережень.

SQM-оцінка світлового забруднення в Україні за даними Globe at Night засвідчує наявність фрагментарних, але інформативних спостережень, які дають змогу простежити локальні контрасти нічного середовища. Український масив даних не формує суцільної національної карти, однак показує окремі точки з різними значеннями, що відображають різний рівень засвічення. Це

дозволяє розглядати Україну як сукупність просторово й часово локалізованих випадків світлового впливу.

Практичні рекомендації за результатами SQM-аналізу зводяться до створення локальної системи моніторингу та поступового управління зовнішнім освітленням на рівні громад і природоохоронних територій. Найбільш ефективними є екранування світильників, зменшення інтенсивності світла, обмеження декоративної підсвітки та контроль освітлення в нічні години низької активності. Повторні SQM-вимірювання дають змогу оцінювати ефективність цих заходів у режимі «до/після» і переводять боротьбу зі світловим забрудненням у площину вимірюваного екологічного управління.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Жук А.В., Зароченцева О.Д. Особливості світлового забруднення навколишнього середовища Чернівецької області. *Ukrainian hydrometeorological journal*, 2021. №27. Р. 66-75
2. Намчук О. Комплексний вплив світлового забруднення на міське середовище: екологічний, соціальний та естетичний виміри. *Містобудування та територіальне планування*, 2025. №90. С.100–113
3. Про проєкт Night Lights: перше в Україні дослідження світлового забруднення територій на основі супутникових знімків URL:<https://ecolog-ua.com/news/pro-proyekt-night-lights-pershe-v-ukrayini-doslidzhennya-svitlovogo-zabrudnennya-terytoriy-na> (дата звернення: 26.04.2026)
4. Семків Ю.М., Андрійчук В.А. Світлове забруднення атмосфери: стан та перспективи вирішення. *Журнал «Світло люкс»*.2008. №3. С.74-77
5. Яценко А.С., Роєнко Л.В. Аграрна освіта та наука: досягнення, роль, фактори росту. *Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування: освіта - наука - виробництво*: матеріали міжнародної науково-практичної конференції, м. Біла Церква, 30 жовтня 2020 року. Біла Церква : Білоцерківський НАУ, 2020. С. 32-35.
6. Anderson S.J, Kubiszewski I, Sutton P.C. The Ecological Economics of Light Pollution: Impacts on Ecosystem Service Value. *Remote Sensing*. 2024. №16(14). P.2591.
7. Barentine J.C. Night Sky Brightness Measurement, Quality Assessment and Monitoring URL: <https://arxiv.org/pdf/2207.03551> (дата звернення: 26.04.2026)
8. Bartolomei M., Olivieri L., Bettanini C., Cavazzani S., Fiorentin P. Verification of Angular Response of Sky Quality Meter with Quasi-Punctual Light Sources. *Sensors*, 2021. №21(22). P.7544
9. Bertolo A., Binotto R., Ortolani S., Sapienza S. Measurements of Night Sky Brightness in the Veneto Region of Italy: Sky Quality Meter Network Results

and Differential Photometry by Digital Single Lens Reflex. *Journal of Imaging*, 2019. №5(5). P.56 URL:<https://www.mdpi.com/2313-433X/5/5/56> (дата звернення: 14.05.2026)

10. Den Outer P., Lolkema D., Haaima M., Van der Hoff R., Spoelstra H., Schmidt W. Stability of the Nine Sky Quality Meters in the Dutch Night Sky Brightness Monitoring Network. *Sensors*, 2015. №15(4). P.9466-9480

11. Christopher C.M. Kyba et al. Citizen scientists report global rapid reductions in the visibility of stars from 2011 to 2022. *Science*, 2023. №379. P.265-268(2023)

12. Earth Observation Group URL:<https://eogdata.mines.edu/products/vnl/> (дата звернення: 26.04.2026)

13. ETC HE Report 2022/8: Review and Assessment of Available Information on Light Pollution in Europe URL:<https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-he/products/etc-he-products/etc-he-report-2022-8-review-and-assessment-of-available-information-on-light-pollution-in-europe> (дата звернення: 26.04.2026)

14. Fiorentin P., Binotto R., Cavazzani S., Bertolo A., Ortolani S., Saviane I. Long-Time Trends in Night Sky Brightness and Ageing of SQM Radiometers. *Remote Sens*. 2022. №14. P.5787

15. Fiorentin, P., Stefano C., Andrea B. SQM Ageing and Atmospheric Conditions: How Do They Affect the Long-Term Trend of Night Sky Brightness Measurements?" *Sensors* 2025, №. 2. P516.

16. Gaston K. J., Sánchez de Miguel A. Environmental impacts of artificial light at night. *Annual Review of Environment and Resources*. 2022. Vol. 47. P. 373–398.

17. Giavi S., Fontaine C., Knop E. Impact of artificial light at night on diurnal plant-pollinator interactions. *Nat Commun*, 2021. №12. P.1690

18. Globe at Night URL:<https://app.globeatnight.org/map> (дата звернення: 14.05.2026)

19. Johnston A.S.A., Kim J., Harris J.A. Widespread influence of artificial light at night on ecosystem metabolism. *Nat. Clim. Chang.* 2025. №15. P.1371–1377
20. Hao Y, Wang P, Zhang Z, Xu Z, Jia D. A Review of the Characteristics of Light Pollution: Assessment Technique, Policy, and Legislation. *Energies.* 2024. №17(11). P.2750
21. Horton K.G., Buler J.J., Anderson S. J., Burt C. S., Collins A. C., Dokter A. M., Guo F., Sheldon D., Tomaszewska M. A., Henebry G. M. Artificial light at night is a top predictor of bird migration stopover density. *Nature Communications.* 2023. Vol. 14.
22. Kolláth Z., Hajdu T., Degen T., Jechow A., Sztakovics J. Conversion between measurement units used for night sky quality assessment with multispectral (RGB) cameras. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.* 2025. Vol. 347
23. Labrousse C., Haspel C., Levin N. Quantifying the impact of the transition to LED lighting on night sky brightness and colour using ground-based measurements and satellite imagery. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.* 2025. Vol. 340.
URL:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022407325001128> (дата звернення: 26.04.2026)
24. Lei T, Hua H, Du H, Xia J, Xu D. Molecular mechanisms of artificial light at night affecting circadian rhythm disturbance. *Arch Toxicol.* 2024 №98(2). P.395-408
25. Levin N. Challenges in remote sensing of night lights – a research agenda for the next decade. *Remote Sensing of Environment.* 2025. Vol. 328.
URL:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425725002731> (дата звернення: 26.04.2026)
26. light pollution URL:<https://www.britannica.com/science/light-pollution> (дата звернення: 26.04.2026)
27. light pollution URL: <https://iucn.org/resources/issues-brief/light-pollution> (дата звернення: 26.04.2026)

28. Light Pollution URL: <https://globeatnight.org/light-pollution/> (дата звернення: 14.05.2026)
29. Linares H. Assessing light pollution in vast areas: zenith sky brightness maps of Catalonia URL:<https://arxiv.org/html/2403.00112v1> (дата звернення: 26.04.2026)
30. Lopez-Farias R., Valdez S. I., Paredes-Tavares J., Lamphar H. Optimization of sensor locations for a light pollution monitoring network. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2023. Vol. 304.
31. Mander S., Alam F., Lovreglio R., Ooi M. How to measure light pollution—A systematic review of methods and applications. *Sustainable Cities and Society*. 2023. Vol. 92
URL:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670723000768> (дата звернення: 26.04.2026)
32. Pérez Vega C, Zielinska-Dabkowska KM, Schroer S, Jechow A, Hölker F. A Systematic Review for Establishing Relevant Environmental Parameters for Urban Lighting: Translating Research into Practice. *Sustainability*. 2022; №14(3). P.1107.
33. Pierantonio C. Night Sky Photometry with Sky Quality Meter URL:https://unihedron.com/projects/darksky/cd/reference/sqmreport_v1p4.pdf (дата звернення: 26.04.2026)
34. POSITION STATEMENT CIE Position Statement on Obtrusive Light and Light Pollution 1 st Edition (November 2025)
URL:https://files.cie.co.at/CIE%20PS%20003_2025%20CIE%20Position%20Statement%20-%20Obtrusive%20Light%20and%20Light%20Pollution.pdf (дата звернення: 26.04.2026)
35. Product's Principal Investigator: Miguel O. Román
URL:https://viirsland.gsfc.nasa.gov/PDF/BlackMarbleUserGuide_v1.2_20220916.pdf (дата звернення: 26.04.2026)
36. Puschnig J., Wallner S., Schwoppe A., Näslund M. Long-term trends of light pollution assessed from SQM measurements and an empirical atmospheric model. 2022 URL:https://www.researchgate.net/publication/364435125_Long-

[term trends of light pollution assessed from SQM measurements and an empirical atmospheric model](#) (дата звернення: 14.05.2026)

37. Ruiyue L., Fei H., Licai D. The cloud cover and meteorological parameters at the Lenghu site on the Tibetan Plateau, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2024. Volume 535, Issue 2. P. 1278–1292

38. Sánchez de Miguel A., Aubé M., Zamorano J., Kocifaj M., Roby J., Tapia C. Sky Quality Meter measurements in a colour-changing world, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2017. Vol. 467, Is.3. P. 2966–2979

39. Schmidt W., Outer P. Stability of the Nine Sky Quality Meters in the Dutch Night Sky Brightness Monitoring Network. *Sensors* 2015. URL:<https://doi.org/10.3390/S150409466> (дата звернення: 14.05.2026)

40. Škvareninová J., Kaniánsky S., Škvarenina J., Korená-Hillayová M., Kaniánska R. Phenological effects of artificial light at night on urban trees: A case study on microclimate and light pollution. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2026. Vol. 116. URL:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1618866725005758> (дата звернення: 26.04.2026)

41. Sky Quality Meter URL:<https://www.unihedron.com/projects/darksky/> (дата звернення: 26.04.2026)

42. Sky Quality Meter – LE URL:<https://unihedron.com/projects/sqm-le/> (дата звернення: 14.05.2026)

43. Sky Quality Meter - Lens Ethernet SQM-LE User manual URL:https://unihedron.com/projects/sqm-le/cd/SQM-LE_Users_manual.pdf (дата звернення: 14.05.2026)

44. Sky Quality Meter - LU-DL URL:<https://www.unihedron.com/projects/sqm-lu-dl/> (дата звернення: 14.05.2026)

45. SQM-LE Operator's Manual URL:
https://unihedron.com/projects/darksky/cd/SQM-LE/SQM-LE_Users_manual.pdf
(дата звернення: 14.05.2026)

URL:https://unihedron.com/projects/darksky/cd/SQM-LU/SQM-LU_Users_manual.pdf (дата звернення: 14.05.2026)

47. Thank you for purchasing a Sky Quality Meter (SQM) from Unihedron!

URL:https://www.unihedron.com/projects/darksky/Instruction_sheet.pdf (дата звернення: 26.04.2026)

48. Thank you for purchasing a Sky Quality Meter (SQM-L) from Unihedron!

URL:https://www.unihedron.com/projects/sqm-l/Instruction_sheet.pdf (дата звернення: 14.05.2026)

49. Zheng S, Chen Y, Eziz A, Kurban A Machine-Learning-Based Monitoring of Night Sky Brightness Using Sky Quality Meters and Multi-Source Remote Sensing. *Remote Sensing*. 2025; № 17(8). P.1332.

Анотація

Клоков Є.О. SQM-вимірювання як інструмент локальної оцінки світлового забруднення. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «Бакалавр» за спеціальністю 101 «Екологія». – Маріупольський державний університет, 2026.

У кваліфікаційній роботі досліджено проблему світлового забруднення як специфічної форми антропогенного тиску, що виникає внаслідок надмірного та невиправданого використання штучного освітлення в нічний час. Актуальність теми зумовлена зростанням екологічного навантаження, поширенням систем зовнішнього освітлення та потребою у науково обґрунтованих підходах до кількісного оцінювання стану нічного світлового середовища.

У першому розділі узагальнено теоретичні основи світлового забруднення, його основні форми та наслідки. У другому розділі розкрито фізичні основи фотометричних вимірювань яскравості нічного неба, охарактеризовано прилади Sky Quality Meter та методику організації SQM-моніторингу. У третьому розділі здійснено порівняльну SQM-оцінку для країн ЄС та України, а також сформульовано практичні рекомендації щодо побудови локальної системи моніторингу й управління зовнішнім освітленням.

Результати роботи підтверджують, що SQM є надійним інструментом кількісної оцінки світлового забруднення за умови врахування атмосферних, місячних і локальних чинників, а також може бути використаний для порівняння територій у часі й просторі.

Практичне значення дослідження полягає в можливості застосування його результатів для вдосконалення екологічного моніторингу, планування освітлення та підвищення якості нічного середовища.

Ключові слова: світлове забруднення, SQM, яскравість нічного неба, mag/arcsec², локальний моніторинг, Globe at Night, штучне освітлення, екологічний вплив.

Abstract

Klokov E.O. SQM measurement as a tool for local assessment of light pollution. Qualification thesis for obtaining the bachelor's degree in the specialty 101 "Ecology". – Mariupol State University, 2026.

In the qualifying work, the problem of light pollution as a specific form of anthropogenic pressure, which arises as a result of excessive and unjustified use of artificial lighting at night, is investigated. The topicality of the topic is due to the increase in environmental load, the spread of outdoor lighting systems, and the need for scientifically based approaches to quantitative assessment of the state of the night light environment.

The first chapter summarizes the theoretical foundations of light pollution, its main forms and consequences. In the second chapter, the physical basis of photometric measurements of the brightness of the night sky is revealed, the Sky Quality Meter devices and the method of organizing SQM-monitoring are characterized. In the third section, a comparative SQM assessment was carried out for the countries of the EU and Ukraine, and practical recommendations were formulated for the construction of a local system of monitoring and management of outdoor lighting.

The results of the work confirm that SQM is a reliable tool for quantifying light pollution, provided that atmospheric, lunar and local factors are taken into account, and can also be used to compare territories in time and space.

The practical significance of the research lies in the possibility of applying its results to improve environmental monitoring, lighting planning and improving the quality of the night environment.

Keywords: light pollution, SQM, night sky brightness, mag/arcsec², local monitoring, Globe at Night, artificial lighting, environmental impact.