УДК 621.311.245:613.64(045)

РОЗРАХУНОК ВІДСТАНІ ВІД ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ВПЛИВУ ЕФЕКТУ МЕРЕХТІННЯ ТІНЕЙ НА ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ

О. І. Запорожець, д-р техн. наук, проф.; ***А. В. Литвинюк***

Національний авіаційний університет

Lav91@ukr.net

Досліджено один із основних аспектів впливу вітрових електростанцій на довкілля — ефект мерехтіння тіней від вітроенергетичних установок. Визначено вплив ефекту на здоров'я людини. Проаналізовано нормативну базу, яка регулює вплив ефекту та його зниження. Наведено метод розрахунку довжини тіні та моделі її поширення, що має практичне застосування при складанні оцінки впливу на навколишнє середовище від вітряних електростанцій. Запропоновано створити нормативну відстань, обґрунтовану розрахунком для запровадження у нормативний документ.

Ключові слова: ефект мерехтіння тіней, відстань від вітрових електроустановок, стандарти, вплив на здоров'я.

The main purpose of this work is to proof the necessity of standards for shadow-flicker as a negative impact on population living nearby wind farm. To define possible health problem that can be caused by flicker effect. Also this paper presents the calculation method of shadow length and the model of its spread by neighboring territories. Recommendations development for establishing appropriate distance from wind turbine to receptor based on calculations and practical observations.

Keywords: shadow-flicker phenomenon, distance from turbine to living areas, standards for flicker phenomenon, impact on the health.

Вступ

Альтернативна енергетика для України вже не є чимось недосяжним чи занадто новітнім. Сьогодні це одне з найважливіших завдань для вирішення, що активно впроваджується і стосується більшості сфер життя: економічної, політичної, екологічної, сфери охорони здоров'я та добробуту населення.

Тепер перед екологами постає завдання вже не ознайомлювати людей з можливостями застосування невичерпних енергетичний ресурсів, а перетворити альтернативну енергетику із «запасного варіанта» на реальне джерело енергії, до якого будуть звертатись не в крайньому разі, а в першу чергу. Вітрова енергія є такою альтернативою. Основою для розвитку галузі має бути якісна нормативна база, що й запропоновано створити. Існуючі в Україні стандарти не охоплюють усіх аспектів вітроенергетики, власне кажучи, вони містять лише термінологію та технічні вимоги до вітроенергетичних установок (ВЕУ), що є мінімально базовим.

Дослідження спрямоване на обґрунтування необхідності створення документу, який би вмістив у собі рекомендації як лікарів, так і проектантів, з такого важливого аспекту вітроенергетики, як мерехтіння тіней від вітротурбіни.

Україна має досить потужний вітропотенціал, хоча вітроелектростанції поки лише набирають популярності, здебільшого на півдні та сході країни, де вітри сильніші і є необхідні площі. У степових районах України та на узбережжях морів середня річна швидкість вітру становить 6 м/с, що робить будівництво ВЕС економічно виправданим.

На жаль, поряд з екологічно чистими перевагами вітрової енергетики, як при будь-якому виробництві, є ще й менш привабливі сторони. Ці сторони розкриваються перед безпосереднім впровадженням проекту на одному із найперших етапів — складанні оцінки впливу на навколишнє середовище.

Вплив виробництва екологічно чистої енергії, як правило, зводиться до впливу на здоров'я та комфортність життя населення поблизу ВЕС. Основними видами впливу є шум та мерехтіння тіней від турбін.

Шумовий вплив регулюється адміністративними заходами більш жорстко: існують стандарти, що обмежують допустиму гучність звуку, встановлюють відстань від ВЕС до житлових районів, необхідну для зменшення звуку до встановлених меж та інші засоби зниження шумового забруднення. Хоча ефект мерехтіння тіней не є таким відомим, він також наявний, має негативний вплив на життя населення і потребує контролю та засобів зниження.

Постановка проблеми

Мета роботи — дослідження ефекту мерехтіння тіней від ВЕУ, його впливу на здоров'я людини.

До **завдань** дослідження належать:

– аналіз нормативної бази, що регулює ефект мерехтіння тіней від ВЕУ;

© О. І. Запорожець, А. В. Литвинюк, 2012

– визначення впливу ефекту на здоров'я та самопочуття населення, що проживає поблизу ВЕС;

– розрахунок довжини тіні, що є визначальним у визначенні відстані від ВЕУ до житлових районів;

– порівняння відстані, визначеної стандартами для зменшення шуму, з відстанню, необхідною для зменшення ефекту мерехтіння тіней.

Ефект мерехтіння тіні виникає, коли лопаті ротора турбіни, обертаючись, періодично відкидають тінь на прилеглі житлові об'єкти, яка є видимою через отвори в будівлі, найчастіше — вікна (рис. 1).

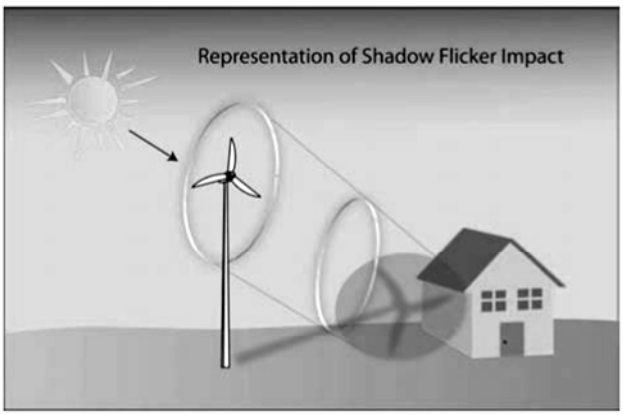

Рис. 1. Ефект мерехтіння тіней (American Wind Energy Assoc.) [1]

Ця проблема виникає при комбінації таких умов: ясна погода (у хмарну погоду тінь відсутня), сонце знаходиться низько над горизонтом (ранкові та вечірні години), ВЕУ знаходиться на шляху між сонцем і житловим приміщенням, відсутні інші перешкоди між сонячними променями і житлом, крім турбіни (наприклад, посадки дерев чи будівлі господарського призначення).

Синдром вітротурбіни.
Внесок ефекту мерехтіння тіней
у захворювання населення

Наявність мерехтіння тіней від турбіни у віконному чи дверному отворі принаймні дратує, а в деяких особливо чутливих індивідів викликає порушення здорового стану та нормальної життєдіяльності. Візуальний вплив, який створюють стометрові споруди, також декому не до вподоби, але ж жити поряд з димлячою трубою ТЕЦ не дуже приємно, а атомних станцій у нас по зрозумілим причинам минулого досвіду побоюються ще більше.

Якщо психологічний шок від таких велетнів поблизу будинку потроху стирається зі звиканням, то реальний вплив на здоров'я із часом збільшується. Вплив ВЕС на здоров'я населення позначають терміном «синдром вітротурбін» (*wind turbine syndrome*) [2]. Цей синдром включає в себе всі можливі причини виникнення поганого самопочуття через життя поруч із вітроелектростанціями.

Найбільш поширеними симптомами є: порушення сну, головний біль, підвищення тиску та шум у вухах, запаморочення, нудота, візуальна розмитість, тахікардія, дратівливість, погана концентрація. Ці симптоми стосуються як впливу шуму, інфразвуку, електромагнітного випромінювання, так і впливу мерехтіння тіней від ВЕУ, і очевидно, що саме сукупний ефект цих факторів спричиняє подібні наслідки.

Визначено, що окремо взятий ефект мерехтіння викликає у деяких людей запаморочення, втрату рівноваги, нудоту, коли вони спостерігають рух тіні від ротора, чи рух самих лопатей. Як і у випадку морської хвороби, такі симптоми виникають, коли три органи сприйняття положення й руху (очі, внутрішнє вухо і розтягувальні рецептори м'язів) не узгоджуються між собою: око сприймає рух, у той час, як вухо і м'язові рецептори — ні. Люди з особистою чи сімейною історією хвороби на мігрень, чи суміжних з мігренню захворювань, таких як морська хвороба чи запаморочення (вертіго), більш схильні до афектації. Стробоскопічний ефект (відбиття сонячних променів від поверхні лопатей) також впливає і може викликати епілептичні напади [3].

Епілепсія є хронічною хворобою, і вважається, що якщо людина за життя мала два або більше нападів, то вона хвора на епілепсію. Для цієї хвороби характерні повторювані напади — фізичні реакції на раптові надмірні електричні розряди в певній групі клітин головного мозку. До 10 % людей на планеті мали чи будуть мати один епілептичний напад за життя. За оцінками, частка загального населення з активною епілепсію, тобто з наявними приступами або потребою в їхньому лікуванні у будь-який момент часу, становить від 4 до 10 на 1000 осіб [4].

Причини ідіопатичної епілепсії невідомі, це вид хвороби без порушень головного мозку, які могли б стати причиною появи припадків, і саме на неї хворі 60 % епілептиків. Епілепсію з відомою причиною називають вторинною чи симптоматичною. Загальні причини включають пошкодження головного мозку через кисневе голодування при народженні або інші травми, сильні удари по голові, інфекції, такі як менінгіт чи пухлина мозку. Ця хвороба має сімейну історію, часто генетично успадковується.

Світлочутлива (фотосенситивна) епілепсія є формою хвороби, при якій напади можуть бути спровоковані візуальними стимулами, наприклад мерехтінням світла та монотонним рухом

об'єктів з певною частотою. Цей вид епілепсії трапляється у 5 % усіх хворих, відповідно у 2,5 млн людей на планеті, тобто 1 з 4000 людей може мати напад, спричинений візуальним мерехтінням. Також слід зауважити, що такі відхилення у віці 7–19 років трапляються у 5 разів частіше, пізніше світлочутливість зберігається у 75 % тих, у кого вона проявилась [4].

Фактори, що провокують епілептичний напад, включають частоту мерехтіння, величину поля зору, що піддається мерехтінню та його контрастність. Вважається, що мерехтіння із середнім діапазоном частоти від 5 до 30 Гц (циклів за секунду) є першочерговою причиною нападів у хворих на світлочутливу епілепсію, хоча ці цифри можуть варіюватись досить широко залежно від індивідуальних особливостей. Варто враховувати, що статичні об'єкти певної геометричної форми також здатні викликати напади, тож частота мерехтіння не єдиний фактор. Щодо геометричної форми, то тут є зв'язок із природними коливальними рухами очей — фізіологічним ністагмом — мимовільним блиманням очей, необхідним для фокусування. У випадках світлочутливої епілепсії це може частково впливати на виникнення нападів.

Мерехтіння від ВЕУ, як причина епілептичних нападів, включає в себе мерехтіння як лопатей, так і тіней від них, оскільки обидва ефекти впливають на сітківку спостерігача однаково. Одна вітрова турбіна зазвичай має три лопаті, що обертаються з частотою 28–30 разів за хвилину, тобто 1,5 Гц за цикл. Цей показник нижчий середнього діапазону частоти (5–30 Гц), що викликає напади. Але якщо чутливий до мерехтіння спостерігач бачить дві турбіни в ряд, то сукупний ефект декількох лопатей збільшується і вже сягає небезпечної зони 3–30 Гц. Це також залежить від кута сонця відносно турбіни та відносно спостерігача, площі сітківки, що задіяна та відстані від турбіни.

Дослідження стосовно кута спостереження підтверджують, що ризик виникнення нападу прямо пропорційно залежить від величини залученої зорової зони. Тому мерехтіння в центрі поля зору є більш провокаційним, ніж мерехтіння у периферійній зоні (10 град у центральному полі зору забезпечують 90 % нейронних посилань від сітківки до мозку) [5]. Якщо 15 % сітківки піддається мерехтінню, це викличе епілептичний напад у 10 % хворих, якщо 50 % сітківки — у 100 %.

Площа сітківки, що стимулюється мерехтінням від ВЕУ, має залежати від площі ротора, яка візуально захоплюється. Але якщо ротор перешкоджає прямому сонячному світлу, відкидаючи тінь на спостерігача, то яскравість мерехтіння буде такою, що стимулюватиме всю площу сітківки.

Таким чином, для переважної більшості населення, велика кількість турбін становить потенційну небезпеку епілептичного нападу (якщо в цей час така людина за кермом, то наслідки можуть бути катастрофічними) поряд із іншими небезпеками для здоров'я [5].

Нормативні документи, які враховують вплив ефекту

На сьогодні при побудові вітчизняних вітроелектростанцій (ВЕС) керуються іноземними стандартами (IFC, IEC). Хоча питання, яке є темою цього дослідження — мерехтіння тіней від ВЕУ — недостатньо охоплюється і в них. Лише в деяких країнах (Німеччина, Данія, Велика Британія, США) існують рекомендації щодо зменшення впливу мерехтіння тіней, але чіткого офіційного нормативного документа немає. Також маємо рекомендації серед наукових робіт працівників охорони здоров'я, занепокоєних станом здоров'я населення поблизу ВЕС, спричинене ефектом мерехтіння тіней.

Стандарти обов'язково мають враховувати рекомендації сфери охорони здоров'я, що ґрунтуються на дослідженнях стану здоров'я і враховують скарги та побажання місцевого населення. Майже одностайно всі медичні дослідження стверджують, що відстань від ВЕС до житлових районів повинна бути не меншою 2000 м [6]. Така відстань має нівелювати сукупний вплив вітроелектростанцій, а не лише звукові чи тіньові ефекти окремо взяті. Якщо шум не є проблемою вже на 800 — 1000 м, то 2000 м потрібно для знешкодження ефекту мерехтіння тіней.

Також установлено безпечну частоту обертання ротора — не більше 2,5 Гц, і рекомендовано не розташовувати станції так, щоб будинки були на сході, північному сході, або північному заході від вітростанцій [7].

Промислові установки ВЕУ повинні мати мінімальний вплив і мають включати етап консультації з місцевим населенням, роз'яснення всіх можливих наслідків і обґрунтування обраних відстаней від житла до вітростанції (що власне і є на практиці).

Модель об'єкта ВЕС має включати інформацію про кількість годин, коли присутня хмарність згідно з історичними метеоданими, про прогнози інтенсивності операційної діяльності станції. Важливим фактором є відсоток навантаження, тобто час, коли ротор буде справді обертатись. Вітер не є настільки постійним ресурсом, тому навряд чи турбіна буде в режимі обертання

безперервно. Дані щодо вітру (сила та напрямок) використовують для прогнозу середньої кількості операційних годин, коли показники вітру достатні для роботи ВЕУ. Також враховується стан атмосфери: наявність аерозолів, диму, пилу та ін., що помітно зменшують виразність тіней.

Створення стандартів має ґрунтуватись на експериментальних та розрахункових даних. Розрахунки тіні в результаті дають нам уявлення про довжину тіней, частоту їх виникнення і модель їх руху залежно від періоду доби та сезону. Практикують проведення розрахунків песимістичного (без урахування хмарності, напрямків вітру, рослинності та інших перешкод) і реального сценаріїв (з урахуванням вищезазначених факторів).

У цьому дослідженні запропоновано новий метод обчислення тіней від ВЕУ, який буде покладений в основу обґрунтування нормативної відстані від ВЕС до житла. Факторами, котрі впливають на комфорт життя місцевого населення, і над якими мають бути проведені розрахунки, є: довжина тіні, напрямок тіні, частота її появи. Контролюючи саме ці параметри, зменшуємо негативний вплив ефекту мерехтіння. Розрахунок довжини тіні необхідний для більш точного визначення відстані між ВЕС і житловими районами. Складаючи вищезгадані параметри в систему розрахунків, ми отримуємо повний спектр необхідних даних, які дадуть нам можливість попередити негативний вплив ефекту.

Розрахунок нормативної відстані для зниження ефекту мерехтіння тіней

Основним завданням роботи є розрахунок довжини тіні від турбіни та її напрямок. Довжина тіні залежить від висоти турбіни та від кута, який визначає висоту сонця над горизонтом. Напрямок залежить від астрономічної величини — азимута та напрямку вітру, який визначає положення ротора та географічних координат самої вітростанції.

Довжина тіні розраховується за формулою:

$$L = \frac{h}{\tan H},$$

де h — висота турбіни; H — висота сонця.

Кут, який визначає висоту сонця над горизонтом, називається *висотою сонця*. Висота визначає «як високо» знаходиться сонце, а азимут — «як далеко в бік від півночі». Від висоти залежить довжина тіні, а від азимуту — в який бік вона падає [8; 9].

Висота визначається за формулою:

$$\sin H = \sin\delta \cdot \sin\varphi + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos t\,.$$

Азимут:

$$\sin A = \frac{\sin\delta - \sin\varphi \cdot \sin H}{\cos\varphi \cdot \cos H}\,.$$

Для визначення висоти необхідно знати значення схилення сонця δ, широту координат розташування ВЕС φ і часовий кут t.

Схилення сонця — кут між екватором і уявною лінією, що з'єднує центри Землі та Сонця — сезонна величина, яка змінюється від 23,45° до — 23,45°; цей кут стає рівним нулю два рази на рік у дні весняного і осіннього рівнодення (додатний, коли в північній півкулі літо і від'ємний узимку). Зміни цього показника протягом року зафіксовано в астрономічних таблицях, з року в рік майже не змінний.

Часовий кут t переводить місцевий сонячний час у число градусів, які сонце проходить по небу (вранці негативний, увечері — позитивний).

$$t = 15°\ (\mathrm{LST} - 12),$$

де LST — місцевий сонячний час, визначається в місці перебування спостерігача залежно від видимого положення сонця на небесній сфері:

$$\mathrm{LST} = \mathrm{GST} + \lambda/15,$$

де GST — сонячний час за Грінвичем; λ — довгота координат ВЕС;

$$\mathrm{GST} = T_o + (\mathrm{GMT}^* \mathrm{C});$$

$$T_o = d^* \mathrm{A} - \mathrm{B},$$

де d — номер дня від початку року; A, B, C — сталі значення з астрономічних календарів [10]

$$\mathrm{GMT} = T_п - 2,$$

$T_п$ — поясний час, якщо розраховуємо для літнього часу, то ще –1.

Значення азимуту залежить від висоти H, від схилення δ і від широти місцезнаходження станції φ.

У розрахунках також необхідно враховувати довжину дня (час між сходом і заходом сонця), кількість сонячних годин щомісяця та напрямок вітру.

Вночі, як і в хмарні дні, вплив тіней від ВЕУ відсутній, а напрямок вітру скеровує положення ротора, чим впливає на напрямок падіння тіні від нього. Хмарність і довжину дня отримуємо з метеорологічних архівів, бажано отримувати кількість сонячних чи хмарних годин на місяць.

Зараз проводиться робота над створенням власної комп'ютерної програми, яка б розраховувала необхідні параметри (довжину тіні, її напрямок та години/хвилини її виникнення), лише запитуючи географічні координати, дату та час, часовий пояс і параметри турбіни (рис. 2).

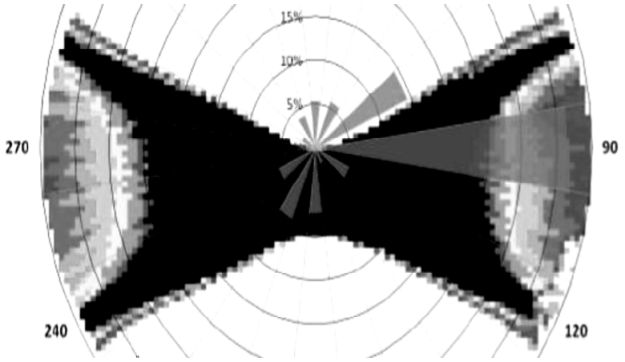

Рис. 2. Вигляд моделі поширення тіні, отриманої за допомогою програмного забезпечення

Роль розрахунків у створенні стандартів може бути не лише як підґрунтя для визначення вимоги загальної відстані спільної для всіх об'єктів, а й як допоміжний механізм, для індивідуальних випадків.

У такому разі стандарт може містити модель розрахунків, поряд із, наприклад, обмеженням «але не менше, ніж 1 км» (керуючись більшістю міжнародних рекомендацій відстані).

Іноземні рекомендації стосовно ефекту мерехтіння тіней (британські, американські, німецькі, датські) запевняють, що доведеною максимальною відстанню, на яку може поширюватися ефект, є відстань, що дорівнює не більше десятикратному розміру діаметра ротора. Тобто, якщо діаметр ротора 100 м, то відстань між турбіною і житлом в 1 км є більш, ніж достатньою для уникнення негативного впливу мерехтіння тіней [1].

Австралійське ж регулювання ефекту встановило єдину відстань — 500 м.

Європейські рекомендації (перейняті німецькі) також встановлюють максимальну кількість годин у рік і хвилин на день, коли жителі можуть переживати ефект мерехтіння — 30 хв/день і 30 год/рік.

З усього вищезазначеного зрозуміло, що основним засобом усунення ефекту мерехтіння тіней є аргументована відстань від резидентів і доріг.

Така відстань має бути встановлена стандартами. Інші способи захисту від мерехтіння тіней від ВЕУ залежать від умов кожної окремої вітроелектростанції та мають бути погоджені з місцевим населенням і відповідати місцевим кліматичним, рельєфним та іншим особливостям (розміщення ландшафтних перешкод, таких як пагорби і дерева, можуть також пом'якшити візуальний дискомфорт).

Висновки

Основними завданнями цієї роботи було:

– звернути увагу на існування ефекту мерехтіння тіней, як на важливий фактор негативного впливу вітроелектростанцій, поряд з шумовим чи електромагнітним забрудненням;

– довести необхідність створення стандарту, спираючись на дослідження негативного впливу на здоров'я місцевого населення, та беручи до уваги відсутність чіткого нормативного документа для врегулювання цього питання як в Україні, так і в світовому просторі;

– представити новий метод обчислення тіней для визначення необхідної відстані від ВЕС до житлових районів, який пропонується використати як основу для майбутнього стандарту.

Ґрунтуючись на цих розрахунках, можна зробити висновок, що рекомендована працівниками охорони здоров'я відстань у 2000 м є завеликою.

Достатньо дотримуватись рекомендацій щодо відстані не меншої десятикратного розміру діаметра ротора, прописаних в європейських регулюваннях. Сучасні ротори мають діаметр близько 100 м, тому відстань у 1000 м є достатньою для подолання ефекту мерехтіння, у більшості випадків.

Так само, як і в законодавстві про забруднення повітря, яке передбачає захист особливо чутливих громадян, нормативи щодо впливу вітростанцій теж мають це передбачати.

Створення якісної нормативної бази означає увібрати в неї отримані розрахунки, експериментальні дані, наявні технічні рекомендації, рекомендації працівників охорони здоров'я, та основні моменти іноземних регулювань та переплести їх в один гомогенний документ.

Такий документ буде основою для якісного розвитку екологічно чистої галузі з високим потенціалом без завдання шкоди для довкіллю і дискомфорту для жителів, для яких і вироблятиметься енергія вітру.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Wind*, Power and Human health: Flicker, Noise and Air quality / West Michigan Wing Assessment Issue Brief #2. — August, 2010.

2. *Pierpont Nina* Wind turbine syndrome: a report on a natural experiment / Nina Pierpont. — Quality Books, Inc., 2009. — 135 p.

3. *Pierpont Nina* Wind Turbine Syndrome: The Health Effects of Wind Turbine Noise and Shadow Flicker / Nina Pierpont. — 08-01-2006.

4. *Harding G.* Wind turbines, flicker, and photosensitive epilepsy: Characterizing the flashing that may precipitate seizures and optimizing guidelines to prevent them / G. Harding, P. Harding, A. Wilkins // Epilepsia, 49(6). —2008. — P. 1095–1098.

5. *Wilkins A.* Characterizing the patterned images that precipitate seizures and optimizing guidelines to prevent them / A. Wilkins, J. Emmett, G. Harding // Epilepsia 46. — 2005. — P. 1212–1218.

6. *Calvin* Luther Martin Your Guide to Wind Turbine Syndrome / Calvin Luther Martin. — July, 2010.

7. *Verkuijlen E.* Shadow hindrance by wind turbines / E. Verkuijlen, C. A. Westra : Proceedings of the European wind Energy Conference (October 1984), Hamburg, Germany.

8. *Даффет-Смит П.* Практическая астрономия с калькулятором / П. Даффет-Смит; [пер. с англ.]. — М. : Мир, 1982. — 176 с.

9. *Хусейн Дж. К.* Оптимизация угла наклона солнечных коллекторов в гелиосистеме / Дж. К. Хусейн, А. Е. Денисова, О. В. Дорошенко // Труды Одесского политехнического университета. — 2007. — Вып. 2(28).

10. *Плетнев С.* Начала астрономии: раздел «Хронометрия» URL. [Электронный ресурс]. ежим доступу: http:// www.astrogalaxy. ru /470.html. — 28.07. 2007.

Стаття надійшла до редакції 07.12.2012.