

УДК 544.7; 535.6

ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОДІЛУ ЗАВИСЛИХ У ПОЛІ ТЯЖІННЯ ЧАСТИНОК НА ПРИКЛАДІ СИНЬОЗЕЛЕНИХ ВОДОРОСТЕЙ

О. І. Єлізаров, В. В. Журав

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: fizika@.kdu.edu.ua

Показано, що при опроміненні білим світлом ємності із деградованими завислими частинками ціанобактерій в результаті розсіювання і поглинання світла відбувається ефект, за якого відбите світло набуває червоного забарвлення, а пройдене – синього, тобто відбувається ефект, зворотній до ефекту Тіндаля. Із використанням теорії Релея щодо розсіювання світла було встановлено механізм даного явища. Із застосуванням статистичного розподілу Больцмана для броунівських частинок у гравітаційному полі визначено розмір частинок деградованих ціанобактерій.

Ключові слова: синьозелені водорості, дисперсне середовище, розподіл.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ В ПОЛЕ ТЯГОТЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ СИНЕЗЕЛЕННЫХ ВОДОРΟΣЛЕЙ

А. И. Елизаров, В. В. Журав

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградського
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: fizika@.kdu.edu.ua

Показано, что при облучении белым светом емкости с деградированными взвешенными частицами цианобактерий в результате рассеяния и поглощения света наблюдается эффект, при котором отраженный свет приобретает красный оттенок, а пройденный – синий, т.е. происходит эффект, обратный эффекту Тиндаля. Использование теории Релея по рассеянию света позволило установить механизм данного явления. При использовании статистического распределения Больцмана к броуновским частицам в гравитационном поле, был определен размер частиц деградированных цианобактерий.

Ключевые слова: синезеленые водоросли, дисперсная среда, распределение.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Значною проблемою великих акваторій є цвітіння води спричинене синьозеленими водоростями. Особливо гостро постає ця проблема для однієї з найбільших річок Європи — Дніпра. Спорудження каскаду ГЕС призвело до зміни водного режиму річки, значного збільшення площі водного дзеркала, що сприяло розмноженню і розвитку синьозелених водоростей (ціанобактерій). Середній розмір цих організмів становить близько 2 мкм, через що їх називають водоростями, хоча насправді вони є бактеріями.

Синьозелені відрізняються здатністю адаптувати склад фотосинтетичних пігментів до спектрального складу світла таким чином, що їхній колір варіюється від світло-зеленого до темно-синього [1].

Метою роботи є залучення оптичних методів для спостереження за процесами зародження, розвитку і деградації синьозелених водоростей.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. У 1869 р. Дж. Тіндаль встановив, що коли направити на дисперсну систему (золь) пучок світла, то всередині золя можна побачити блакитного кольору конус [2, 3].

Нами встановлені незвичні оптичні ефекти, що виникають у водній суспензії ціанобактерій при їх деградації. Так, при опроміненні білим світлом ємності із завислими частинками деградованих ціанобактерій у відбитому світлі забарвлення кювети набуває червонуватого відтінку, а в пройденому – синьо-блакитного (рис. 1). Створюється враження, що ціанобактерії при їх розкладанні вивільняють якийсь інтенсивний барвник, яким, наприклад, може бути марганець зі ступенем окиснення сім, що міс-

ється у складі ціанобактерій у волутині. Але, у даній роботі встановлено, що забарвлення виникає в результаті складних закономірностей розсіювання і поглинання світла в середовищі з ціанобактеріями.

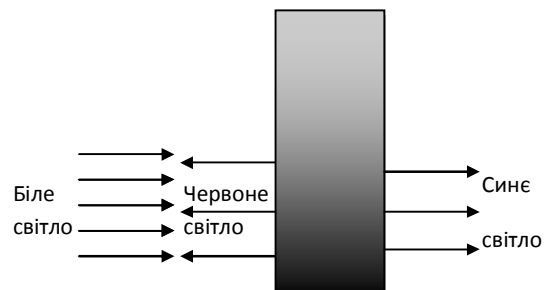


Рисунок 1 – Схема взаємодії білого світла з деградованими ціанобактеріями

Якщо золь спостерігати в пройденому й бічному світлі, то можна побачити цікаві явища: безбарвний золь у пройденому світлі здається прозорим, а в бічному світлі – каламутним; промінь світла, проходячи через золь, залишає в ньому світлу смугу. Це явище має назву опалесценції.

Явище опалесценції, конус Тіндаля, – це наслідок розсіювання світла. Теорію цього явища розробив англійський учений Дж. У. Релей (1871 р.).

Якщо радіус частинок золю менший за довжину напівхвилі падаючого світла ($r < \lambda/2$), то промінь світла не відбивається, а огинає частинку під різними кутами. Це і є причиною розсіювання світла.

Релей створив теорію цього явища, у першу чергу, для золь діелектриків, які не мають поверхневого заряду.

У загальному вигляді рівняння Релея має вигляд:

$$I = AI_0, \quad (1)$$

де I – інтенсивність розсіяного світла; I_0 – інтенсивність падаючого світла; A – стала, яка залежить від концентрації частинок і довжини хвилі.

При $r < (\lambda/20)$ рівняння Релея набуде вигляду

$$I = 24p^3 \left(\frac{n_2^2 - n_1^2}{n_2^2 + 2n_1^2} \right)^2 \frac{V^2 n}{I^4} I_0, \quad (2)$$

де v – концентрація частинок у дисперсній системі; V – об'єм однієї частинки; λ – довжина хвилі падаючого світла; n_2, n_1 – показники заломлення дисперсної фази і дисперсного середовища.

З рівняння Релея випливає, що яскравість опалесценції зростає зі зменшенням довжини хвилі.

Блакитне світіння обумовлене тим, що розсіювання коротких хвиль (синіх і фіолетових) відбувається інтенсивніше, ніж довгих (червоних і жовтих).

У пройденому світлі відносний вміст променів з короткою довжиною хвилі буде зменшуватися, тому каламутні середовища, що опалісцюють блакитним світлом, у пройденому світлі здаються червонуватими або навіть червоними, якщо каламутність досить сильна.

Інтенсивність розсіяного світла залежить від ступеня дисперсності. Найбільшим світлорозсіянням буде в дрібнодисперсних системах, меншим – у грубодисперсних. В останніх буде переважати відбивання, а не розсіювання світла.

Радіус частинок і їхній розподіл за розмірами визначають зміну відтінку або навіть кольору пігменту у результаті розсіювання різної частини спектра. Поглинання світла поряд з його розсіюванням робить залежність кольору дисперсії ще більш складною. Встановлено, що максимум інтенсивності розсіяного світла й розмір частинок r_{\max} пов'язані рівнянням

$$r_{\max} = 0,447 \frac{I}{p(n_1 - n_2)},$$

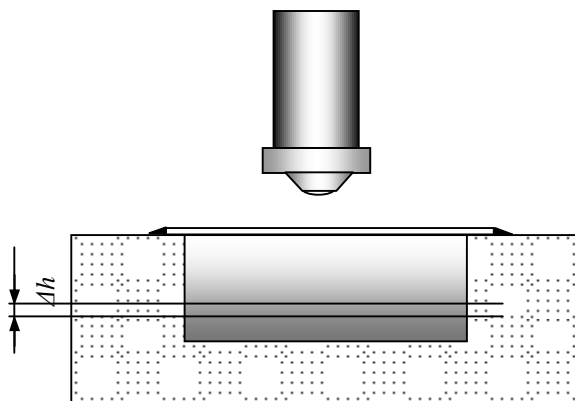


Рисунок 2 – Схема дослідження Перена

де λ – довжина хвилі падаючого світла; n_1, n_2 – коефіцієнти заломлення світла дисперсного середовища і дисперсної фази [2].

Рівняння Релея справедливі тільки для систем з дисперсними частинками правильної сферичної форми. Для систем з асиметричними частинками створені теорії, у яких розсіювання світла пов'язують із кутом падіння.

Завислі в рідині малі частинки перебувають в неперервному хаотичному русі. Такі частинки називаються броунівськими. У полі тяжіння Землі розподіл броунівських частинок підпорядковується закону Больцмана.

$$n = n_0 e^{-\frac{mgh}{kT}}, \quad (3)$$

де n і n_0 концентрації частинок на висоті h і на нульовому рівні, m – маса частинки, k – стала Больцмана, T – температура.

Справедливість закону Больцмана у 1909 році експериментально перевірів французький дослідник Жан Батист Перен. В досліді Перена вивчався розподіл концентрації дрібнодисперсних частинок смоли гумігугу в воді. Для підрахунку броунівських частинок Перен проводив миттєві фотознімки шару емульсії Δh . Потім підраховував зерна по фотографії [3]. Схема досіду Перена показана на рис. 2.

Тоді, якщо завислі у воді частинки ціанобактерій у фазі деградації останніх є броунівськими частинками, то вони в розподілі своєї концентрації по вертикалі повинні підкорятися закону Больцмана (3). В такому випадку розподіл Больцмана дозволяє оцінити масу, а, значить, і розмір броунівських частинок. І, якщо цей розмір буде близький до довжин хвиль видимого діапазону (0,4 – 0,8 мкм), то можна стверджувати, що забарвлення води, насиченої ціанобактеріями спричиняють оптичні явища розсіювання світла каламутними середовищами.

Ми в своєму досліді розподіл частинок у полі гравітації визначали за проходженням світла через їх водну суспензію. Схему дослідної установки показано на рис. 3.

Для досліді використовувалися синьозелені водорості зібрані літньо-осінній період акваторії Кременчуцького водосховища у фазі їх деградації. Суспензію з деградованих частинок синьозелених водоростей наповнювали скляну ємність заввишки 1 м і завтовшки 10 мм.

Після декількох годин витримки кювети в нерухомому стані можна було вважати, що розподіл частинок набував сталого виду. Для його визначення через кювету пропускався вузький пучок світла від освітлювача з конденсором діаметром 10 мм і досліджувалось його проходження в залежності від висоти шару суспензії (рис. 3).

Пройдене світло потрапляло на фоторезистор ФСК-1, який в свою чергу був підключений до міліамперметра. Таким чином струм, що реєструвався міліамперметром пов'язаний зі світловим потоком, падаючим на фоторезистор. Світлові характеристики фоторезисторів, взагалі кажучи, не є нелінійними.

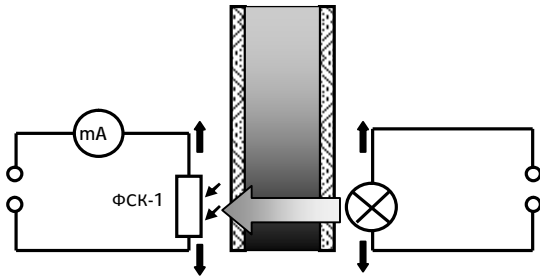


Рисунок 3 – Схема дослідної установки з визначення розподілу частинок

Залежність фотоструму від світлового потоку звичайно має степеневий характер:

$$I = D\Phi^{\alpha}, \quad (4)$$

де D і α деякі коефіцієнти, відмінні для кожного типу фоторезисторів. Проте в межах невеликих змін світлового потоку можна вважати $\alpha \approx 1$.

Для перевірки цього припущення для нашого фоторезистора методом комп'ютерної графіки були виготовлені періодичні структури певного рівня прозорості і перенесені на поліетиленову плівку. Прозорість їх визначалася співвідношенням площ прозорої і непрозорої частин. Приклади решіток показані на рис. 4.

Пропустивши світло через декілька решіток, і зареєструвавши фотострум, для використаної нами оптопари отримали лінійну залежність струму від прозорості решіток (рис. 5), що дозволяє вважати залежність струму I від світлового потоку Φ , при невеликих змінах останнього, лінійною.

Подавана на ФСК-1 напруга становила 100 В.

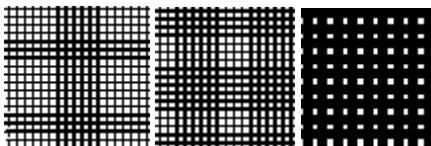


Рисунок 4 – Приклади решіток прозорістю 0,25, 0,44, 0,83

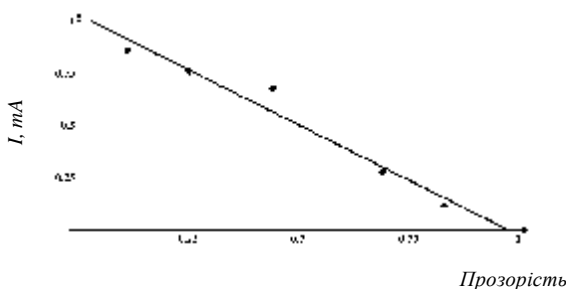


Рисунок 5 – Світлова характеристика оптопари

Для дослідження розподілу частинок в полі тяжіння нами були підготовлені три суспензії водоростей різної концентрації шляхом додавання певної порції дистильованої води. Перша порція складалася

з досить концентрованої водної суспензії деградованих після заморожування водоростей, до якої було додано дистильовану воду в співвідношенні 1:2. Для другої і третьої порції співвідношення становили 1:2,5 і 1:3,3.

В результаті проведених експериментів для різних концентрацій суспензії було зафіксовано суттєве зменшення її прозорості при переході від верху кювети до її низу (рис. 6).

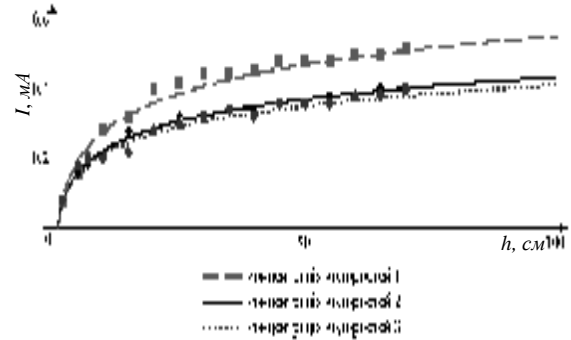


Рисунок 6 – Лінійний масштаб залежності ФС від висоти для трьох концентрацій шару суспензії ціанобактерій

Ця обставина дозволяла сподіватися на те, що вказані залежності опосередковано містять в собі інформацію про розподіл частинок деградованих ціанобактерій в полі тяжіння і цей розподіл повинен підкорятися розподілу Больцмана (3).

Проте, безпосередньо, розподіл Больцмана (3), строго кажучи, відповідає термодинамічній системі частинок, що мають однакову масу.

При деградації синьозелених водоростей, звісно, утворюються частинки різних розмірів. Але серед них можна виділити якийсь характерний розмір частинок, який буде мати більшість з них. Промодельємо розподіли для частинок трьох різних мас і розподіл їх сукупності, коли половина з них становить якусь характерну масу (рис. 7).

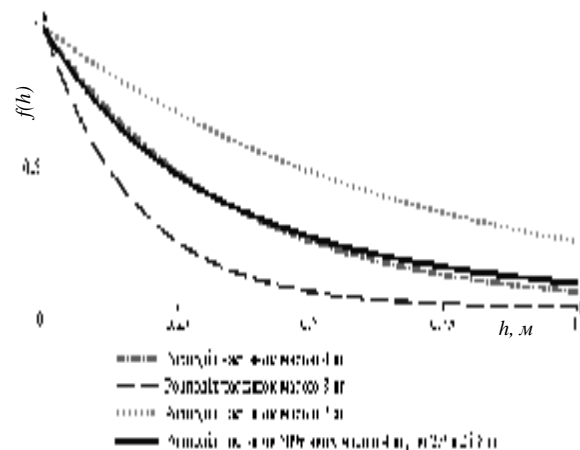


Рисунок 7 – Функції розподілу частинок масами 2 аг, 4 аг, 8 аг і їхньої сукупності, коли 50% частинок масою 4 аг, і по 25% 2 і 8 аг.

Як бачимо з графіку, функція розподілу для сукупності частинок незначно відрізняється від функції

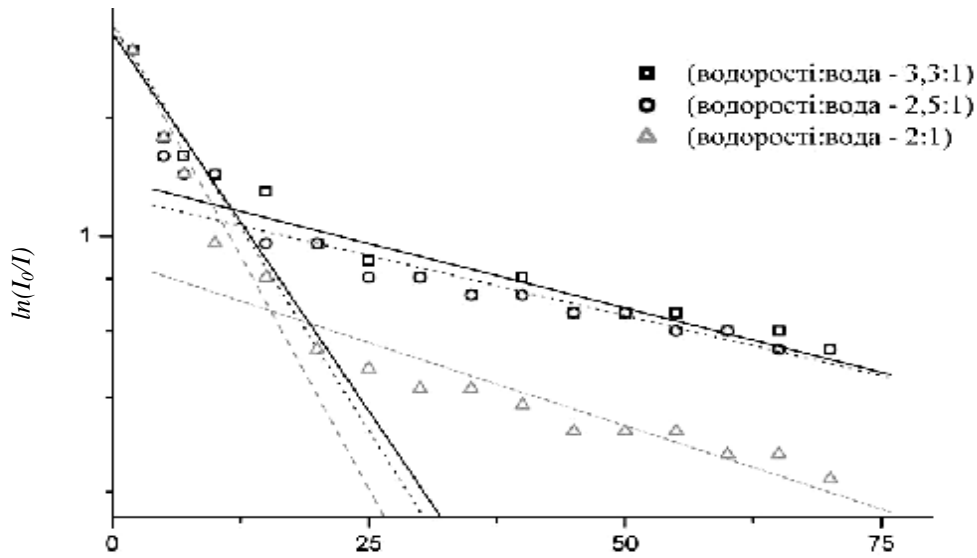


Рисунок 8 – Залежність логарифму відношення фотострумів на фоторезисторі від висоти шару суспензії ціанобактерій (I_0 – фотострум при проходженні світла через кювету з дистильованою водою)

ції розпізнає частинки характерного розміру. Тому обробку експериментальних даних будемо проводити вважаючи, що в досліджуваному дисперсному середовищі домінуючими будуть частинки певного характерного розміру. Ми не виключали також можливу присутність частинок з масами, суттєво відмінними від характерної маси m_x . У цьому випадку легкі частинки ($m_l \ll m_x$) не внесуть зміни в досліджуваний розподіл з причини малої зміни експоненти (3) в межах висоти кювети. Навпаки, важкі частинки ($m_g \gg m_x$) в своєму розподілі будуть „притиснуті” до дна кювети: в загальну криву розподілу вони внесуть вклад лише на малих висотах стовпа суспензії.

Задамо характерну масу частинок, прийнявши, що вони мають форму кулі $m = \rho \cdot V = 1/6 \pi d^3 \rho$. Густина ρ частинок ціанобактерій не суттєво відрізняється від густини води.

Тоді, згідно (5) діаметр частинок визначається як

$$d = \sqrt[3]{\frac{6kT \ln\left(\frac{n_0}{n}\right)}{\rho g h}} \quad (6)$$

На відміну від згаданої вище класичної роботи Перена, наші досліди не дозволяли безпосередньо вимірювати концентрації частинок на різних висотах кювети, а тому відношенню концентрацій в (6) потрібно було співставити параметри проходження світла через суспензію на умовно нульовій висоті (дно кювети) і висоті h .

В пошуках такої відповідності ми керувалися наступним. Спад інтенсивності світла di , що проходить через середовище буде пропорційним інтенсивності i з певним коефіцієнтом розсіювання β і товщі середовища dx . Тут x – координата кювети в горизонтальному напрямку.

$$di = -i \beta dx.$$

Знайдемо розв’язок цього диференціального рівняння

$$\frac{di}{i} = -\beta dx; \quad (7)$$

$$\int_{i_0}^i \frac{di}{i} = -\int_0^x \beta dx;$$

$$i = i_0 e^{-\beta x}. \quad (8)$$

Дане рівняння подібне до рівняння Бугера-Ламберта-Бера, з тією відмінністю, що коефіцієнт β є коефіцієнтом розсіювання, а не поглинання. Аналогічно лінійній залежності коефіцієнта поглинання від концентрації розчину будемо вважати лінійною від концентрації броунівських частинок і залежність коефіцієнта розсіювання β . Отже

$$\frac{n_0}{n} = \ln\left(\frac{i_0}{i}\right) = \ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = e^{\frac{mg(h_1-h_2)}{kT}}, \quad (9)$$

де I_1 і I_2 значення фотострумів на висоті h_1 і h_2 .

Тоді

$$\ln\left(\ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right)\right) = \frac{mg}{kT} (h_1 - h_2) \quad (10)$$

є лінійною функцією h , кут нахилу якої дозволяє визначити масу частинки.

Перебудовані в координатах $\ln\left[\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)\right], h$

(рис. 8) криві рисунку 6 дійсно виявили близький до лінійності характер. При цьому на них можна виділити дві ділянки з різним нахилом, що відповідають розподілам частинок з різними масами, одна з яких є

характерною для основного об'єму суспензії, і друга – важка. Розподіл останньої локалізований біля дна кювети.

Скориставшись формулами (6) і (9) знаходимо розміри частинок, що відповідають цим масам:

$$d_1 = 2,1 \cdot 10^{-8} \text{ м.}$$

$$d_2 = 4,3 \cdot 10^{-8} \text{ м.}$$

Таким чином отриманий розмір деградованих частинок ціанобактерій на порядок менший ніж довжина хвилі видимого світла, і це може пояснити оптичні явища, які виникають при проходженні білого світла через водну суспензію синьозелених водоростей.

ВИСНОВКИ.

1. Встановлено механізм виникнення специфічних оптичних явищ, що мають місце в суспензії ціанобактерій.

2. Запропоновано оригінальний метод

визначення розподілу частинок в гравітаційному полі Землі.

3. Визначено характерні розміри частинок синьозелених водоростей в одній із стадій їхньої деградації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Голлербах М.М., Косинская Е.К., Полянский В.И.. Синезеленые водоросли. – М.: Советская наука, 1953. – 652 с.

2. Волков В.А. Коллоидная химия. — М., 2001. – URL: <http://www.xumuk.ru>

3. Физическая энциклопедия: [в 5 т.] / Гл. ред. А.М. Прохоров, редкол.: Д.М. Алексеев и др. — М., 1988 — 1998.

FEATURES OF DISTRIBUTION HINGING OF PARTICLES ON THE EXAMPLE OF BLUE-GREEN ALGAE

O. Elizarov, V. Zhurav

Kremenchuk Mikhaylo Ostrohradskiy National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: fizika@.kdu.edu.ua

It is shown that at the colourless light irradiation in the tanks filled with the degraded suspended particles of cyanobacteria the effect is registered, which is the result of light dispersion and absorption, when the reflected light tinges red, and passed one tinges blue, i.e. this is the effect, which is reverse to the Tindal effect. The light dispersion Relei theory applying allows to set the mechanism of this phenomenon. With regard to the brownian particles Boltzmann statistical distribution in the gravity field, the size of particles of the degraded cyanobacterias was defined.

Key words: blue-green algae, dispersion medium, distribution.

REFERENCES

1. Gollerbah M. M., Kosinskaja E. K., Polansky V.I., *Bluegreen algae*. – М.: Sov. nauka, 1953. – 652 p. [in Russian]

2. Wolkov V.A. *Colloid chemistry*. – М., 2001. URL: <http://www.xumuk.ru> [in Russian]

3. *Encyclopaedia of physics*: [in 5 v.] / Ed. A.M. Prokhorov: D.M. Alekseev. – М., 1988–1998. [in Russian]

Стаття надійшла 18.05.2012.

Рекомендовано до друку
к.х.н., доц. Козловською Т.Ф.