

Mathematical reasoning of age determination of Quaternary sediments

Sergiy Prylypko, Sofia Alpert

Institute of Geological Science of NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

article info

key words

luminescence methods, thermoluminescence method, Quaternary sediments, mathematical reasoning, paleodosimeters.

correspondence to

Sofia Alpert; Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth, Institute of Geological Sciences, NAS of Ukraine; 55-b Oles Gonchar Street, Kyiv, 01054 Ukraine,
Email: sonyasonet87@gmail.com
orcid: 0000-0002-7284-6502

article history

Submitted: 02.02.2023. Revised: 01.03.2023. Accepted: 30.06.2023

cite as

Prylypko, S., S. Alpert. 2023. Mathematical reasoning of age determination of Quaternary sediments. *GEO&BIO*, 24: 159–165. [In Ukrainian, with English summary]

abstract

The possibilities of applying the thermoluminescence method (TL-method) to investigate Quaternary sediments have been considered. The TL-method is used for dating in archaeology and geology. It was noted that this method covers larger age intervals than carbon dating. The TL-method is based on the measurement of the decay energy of natural radionuclides that are present in the rock. Therefore, the TL-method can be applied to the development of methodical and methodological issues of geochronology. Geochronological methods make it possible to date Quaternary sediments with a laboratory error of about five percent. Thus, it can be considered that the practical application of the thermoluminescence method for Quaternary sediments is highly important. This method provides a more detailed and accurate display of geochronological events. A new mathematical approach of age determination of Quaternary sediments applying the TL-method has been proposed. This new method can be applied for determination of the age of sediments and for conducting correlations between Neopleistocene sediments of remote regions. It has been noted that the TL-method of determination of the 'absolute' and relative age of Quaternary sediments is based on the properties of quartz crystals to accumulate energy of decay and to emit it during heating. It also was noted that quartz crystals as paleodosimeters can accumulate and preserve the age-related information for a long period of time. Quartz is the most common natural paleodosimeter. A mathematical formula for the age parameter has been proposed, using the energy that was accumulated by the investigated sample over time, the velocity of the formation of radiation defects, and the velocity of annihilation. The mathematical derivation of the formula for the age parameter is presented. The solution of the differential equation is described in detail. The proposed approach shows which sediments of an area are younger and which are older. It is emphasized that the proposed mathematical approach to the TL-method is effective for age determination of rocks, determining the sequence of the rock accumulation and for conducting correlation of different Quaternary sediments from different sections.

Математичне обґрунтування визначення віку четвертинних відкладів

Сергій Прилипко, Софія Альперт

Резюме. Розглянуто можливість застосування термолюмінесцентного методу (ТЛ-методу) з метою дослідження четвертинних відкладів. ТЛ-метод застосовується для датування в археології та геології. Відзначено, що цей метод охоплює більші вікові інтервали ніж радіовуглецеве датування. ТЛ-метод базується на вимірюванні енергії розпаду природних радіонуклідів присутніх у породі. Тому цей ТЛ-метод може бути застосований для розробки методичних та методологічних питань геохронології. Геохронологічні методи дозволяють датувати четвертинні відклади з лабораторною похибкою близько п'яти відсотків. Таким чином, можна рахувати, що практичне застосування термолюмінесцентного методу для четвертинних відкладів має дуже велике значення. Даний метод забезпечує більш детальне і точне відображення геохронологічних подій. Було запропоновано новий математичний підхід визначення віку четвертинних відкладів термолюмінесцентним методом. Показано, що цей запропонований метод може бути застосований для визначення віку відкладів та для встановлення кореляцій між неоплейстоценовими відкладами віддалених регіонів. Нами відзначено, що термолюмінесцентний метод встановлення «абсолютного» та відносного віку четвертинних відкладів заснований на властивості кристалів кварцу накопичувати енергію розпаду та віддавати її під час нагрівання. Також було зазначено, що саме кристали кварцу як палеодозиметри можуть накопичувати та зберігати вікову інформацію протягом тривалого часу. Кварц є найбільш поширеним природним палеодозиметром. Нами запропоновано математичну формулу визначення вікового параметра, використовуючи енергію, накопичену досліджуваним зразком в часі, швидкість утворення радіаційних дефектів і швидкість анігіляції. Зроблено математичне виведення формули для визначення вікового параметра. У даній статті нами було детально описано розв'язання диференціального рівняння. Запропонований підхід показує, які із відкладів досліджуваної ділянки є молодшими, а які древніші. Підкреслено, що запропонований математичний підхід до термолюмінесцентного методу є ефективним при визначенні віку та встановленні послідовності накопичення порід та для проведення кореляції різних четвертинних відкладів із різних розрізів.

Ключові слова: люмінесцентні методи, термолюмінесцентний метод, четвертинні відклади, математичне обґрунтування, палеодозиметри.

Адреса для зв'язку: Софія Альперт; Науковий центр Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України; вул. О. Гончара, 55-6, Київ, 01054 Україна, orcid: 0000-0002-7284-6502, Email: sonyasonet87@gmail.com

Вступ

Важливим завданням сучасних геохронологічних досліджень є встановлення віку та послідовності геологічних відкладів, які складають досліджувані горизонти.

Це актуально не тільки для розуміння процесів, які відбувалися в певні періоди часу, а і для реконструкції кліматичних явищ, які впливали на формування даного розрізу.

При датуванні геологічних відкладів використовується цілий комплекс методів: фізичних, геохронологічних, палеонтологічних, літологічних та інших.

До фізичних методів відносяться такі методи визначення віку: ТЛ-метод (thermoluminescence method, термолюмінесцентний метод), OSL-метод (optically stimulated luminescence method, оптично стимульований люмінесцентний метод), палеомагнітний метод, C^{14} (вуглецеве датування) та інші, за допомогою яких визначаємо відносний та абсолютний вік досліджуваних розрізів та горизонтів.

На територіях, де виникають спірні питання геохронологічного розчленування неоплейстоценових відкладів необхідні комплексні детальні геохронологічні роботи.

Термолюмінесцентне датування — методологія, яка базується на вимірюванні кількості енергії, яка випромінюється у вигляді світла, що накопичується у осадових породах та ґрунтах. Цей метод є потужним інструментом, який допомагає визначати вік четвертинних відкладів.

Застосування TL-методу

Більшість мінералів надзвичайно чутливі до великої кількості зовнішніх факторів, які впливають на їх кристалічну структуру. Ми використовуємо мінерали, які здатні накопичувати в своїй кристалічній решітці вікову інформацію і виступати в ролі палеодозиметра.

В якості природного палеодозиметра можуть виступати різні оптично прозорі мінерали-діелектрики. Одним із них є кварц, мінерал, який широко розповсюджений в земній корі. Лесові породи на 80% складаються із кристалів кварцу. Кристали кварцу мають таку властивість як здатність накопичувати енергію розпаду радіоактивних природних радіонуклідів, присутніх в породі. Відклади лесової формації складаються в основному із пиловатих зерен, проміжки між якими заповнені глинистими частинками. Самі кварцові зерна не мають радіоактивних властивостей. Зате глинисті частки здатні відсорбовувати радіонукліди, що утворює сприятливі умови для радіоактивації кристалів кварцу.

Необхідною умовою для достовірності TL-досліджень є обов'язкове стирання (обнуління) попередньо накопиченої, так званої, прогенетичної світлосуми в кристалах кварцу.

Формування субаеральних лесових відкладів антропогену відбувається під впливом зовнішніх факторів, зокрема, пов'язаних із впливом сонячної радіації. При переміщенні частинки пилу піддаються відбілюючому ефекту, тобто зняттю прогенетичної світлосуми. Під впливом ультрафіолетового випромінювання вони повністю втрачають свою раніше накопичену кристалами кварцу прогенетичну світлосуму.

Деякі мінерали, такі як кальцит, польовий шпат і кварц здатні накопичувати енергію з відомою швидкістю. Ця енергія міститься в кристалічних решітках мінералу. Під час нагрівання ці кристали віддають накопичену ними енергію [Singhvi & Mejdahl 1985].

Лесова формація як правило містить велику частку пиловатого кварцу, який виступає в ролі природного палеохронометра.

Коли ми визначаємо вік відкладів, гірських порід або артефактів, припускаємо, що будь-який раніше захоплений заряд було видалено під дією денного світла під час осадкоутворення або транспортування. Цей процес відомий як обнуління, скидання або відбілювання.

Дана методика широко застосовується в археології та геології для датування геологічних відкладів та гірських порід. Методи TL, OSL вимірюють енергію накопичену після того, як об'єкт був обнулений під впливом ультрафіолетового світла. Вони фіксують момент, коли об'єкт в останнє зазнав опромінення сонячним світлом (ультрафіолетового спектру). Датування TL — OSL базується на тому факті, що мінерали кварцу зберігають дані про дозу опромінення, отриману ними від природних радіонуклідів протягом часу перебування в породі в захороненому стані.

Термолюмінесцентне датування є точним в діапазоні від кількох тисяч до кількох сотень тисяч років. Методи, такі як TL-метод, OSL-метод і C^{14} є інформативними та широко вживаними дозиметричними методами [Bøtter-Jensen *et al.* 2000]. Застосування TL-методу дозволяє оцінити основні вікові характеристики, тобто час, який пішов на формування геологічних тіл і розрізів. [Greilich *et al.* 2002]. При застосуванні термолюмінесцентного методу ми вимірюємо енергію випромінену зразком під впливом температури в діапазоні від 0 до 350 $^{\circ}\text{C}$, а оптично стимульована люмінесценція викликається енергією лазерного променя, тобто лазером.

Слід зазначити, що можливість застосування TL-методу для визначення віку мінералів і родовищ вперше запропонував хімік Д. Фаррінгтон у 1950-х роках. Протягом 1960-х і 1970-х років дослідницька лабораторія археології та історії мистецтв Оксфордського університету проводила роботи з вдосконалення TL-методу для датування археологічних матеріалів. TL-метод використовується з метою визначення віку керамічних артефактів. В Україні TL-метод розроблявся та впроваджувався В. М. Шовкоплясом та Г. В. Морозовим.

Метод визначення відносного та «абсолютного» віку четвертинних відкладів ґрунтується на властивостях кристалів кварцу накопичувати енергію радіоактивного розпаду радіонуклідів,

присутніх в породі і потім під дією температурного впливу випромінювати її у вигляді світлового потоку.

Методика TL-датування ґрунтується на тому, що термолюмінесценція в мінералах виникає під дією фонові радіації і її розмір пропорційний потужності дози радіоактивації кристалів та тривалості її дії.

Тому, знаючи швидкість накопичення енергії (світлосуми) за одиницю часу ерг/рік при незмінній природній радіоактивності можна встановити вік зразка в роках, який реєструють у вигляді площі під кривою теплового випромінювання або по інтенсивності піку цієї кривої. Потім ми ділимо кількість накопиченої енергії на фонову радіоактивність осаду чи породи. Після цього розраховуємо значення, яке характеризує вік досліджуваного зразка. Більш давні четвертинні відклади мають більші індекси віку, а молодші — менші. Слід зазначити, що палеодозиметр може накопичувати та зберігати вікову інформацію протягом тривалого часу [Prylypko & Alpert 2019]. Вік відкладів визначається як відношення еквівалентної дози до річної потужності дози [Liritzis *et al.* 2013]. Еквівалентна доза вимірює загальне опромінення радіоактивністю, отриманою зразком за час перебування в породі. Потужність дози — річна швидкість опромінення.

Оптично стимульована люмінесценція використовується для визначення віку кам'яних знарядь, артефактів і кераміки, яка була обпалена в печах при виготовленні виробу [Gleichen *et al.* 2005].

Поділивши зафіксовану накопичену енергію на природну радіоактивність породи, одержуємо результат, який характеризує вік зразка.

Таким чином TL-метод надає досить точні результати не тільки стосовно віку, а і в плані послідовності накопичення та кореляції четвертинних відкладів.

Робота виконана з метою вдосконалення TL-методу, спрощення камеральної обробки як відібраних зразків, так і в напрямку можливого розширення меж застосування TL-методу, збільшення вікових інтервалів тощо.

Дана робота сприяє спрощенню проведення геохронологічних розрахунків, поглиблення стратиграфічних висновків при аналізі опорних розрізів та при проведенні широких кореляцій, встановленні стратиграфічної послідовності горизонтів і відкладів. Також завданням статті є встановлення і внесок в розрахунки віку відкладів різних факторів, таких як: вплив альфа, бета та гамма-випромінювання на формування прогенетичної світлосуми в породі, нівелювання радіоактивності під впливом зовнішніх факторів, пов'язаних із температурним режимом, сонячною радіацією, вологістю та привнесенням радіоактивних елементів у ґрунт.

Результати нашого дослідження можуть бути використані для геохронологічного розчленування антропогенних (четвертинних) відкладів, їх кореляції та стратифікації.

Основною метою даної статті є пропозиція нового математичного підходу до визначення віку четвертинних відкладів термолюмінесцентним методом.

Визначення віку відкладів є одним із найскладніших завдань геології. Це допомагає нам досліджувати й аналізувати складні геологічні процеси та їхню закономірність і послідовність. Детальне вивчення та аналіз стратиграфічної будови відкладів в розрізах вимагає застосування різних фізичних та математичних підходів, які допомагають охарактеризувати леси, викопні ґрунти та інші типи порід. Слід зазначити, що деякі фізико-математичні методи використовуються для визначення віку, що вказує на період формування та відкладення досліджуваних відкладів [Gozhyk *et al.* 2014; Komar *et al.* 2022].

Визначивши вік, ми можемо досліджувати різні розрізи, проводити кореляції між віддаленими територіями та досліджувати процеси, що відбувалися на цих ділянках. Коли встановлені процеси на досліджуваних ділянках ідентичні процесам, що відбуваються в інших досить віддалених регіонах, ми можемо впевнено їх спів- вставляти. На рис. 1 представлений класичний четвертинний розріз середнього Придніпров'я Максимівка.



Рис. 1. Класичний четвертинний розріз (Максимівка).

Fig. 1. A classic Quaternary section (Maksymivka).

Математична модель

Важливим завданням при визначенні віку четвертинних відкладів TL-методом є точний розрахунок значення T (T -параметр віку). Слід зазначити, що значення цього вікового параметру прямо пропорційне часу формування досліджуваних відкладів.

Віковий параметр визначається наступною формулою: $T = \frac{D}{P}$,
де T — час, D — доза накопичена зразком, P — річна доза.

Припустимо, що альфа, бета та гамма-випромінювання радіонуклідів протягом усього періоду захоронення відкладів утворюють структурні дефекти з постійною швидкістю — $V_{\alpha,\beta,\gamma}$, які здатні випромінювати кванти світла при нагріванні.

Слід зазначити, що швидкість утворення радіаційних дефектів визначається за наступною математичною формулою:

$$V_{\alpha,\beta,\gamma} = \beta \cdot E, \quad (1)$$

де величина β — дозова чутливість досліджуваного мінералу, величина E — це потужність експозиційної дози альфа, бета та гамма-випромінювання.

Припустимо, що швидкість анігіляції є пропорційною n — концентрації електронів у кварці в даний момент часу:

$$V_A = k \cdot n, \quad (2)$$

де V_A — швидкість анігіляції, k — константа швидкості анігіляції локалізованих електронів або коефіцієнт пропорційності.

Швидкість утворення радіаційних дефектів $V_{\alpha,\beta,\gamma}$ дорівнює швидкості їх анігіляції:

$$V_{\alpha,\beta,\gamma} = V_A. \quad (3)$$

Якщо у виразах (1) та (2) рівні ліві частини, то звідси випливає, що будуть рівні і праві частини, тобто:

$$\beta \cdot E = k \cdot n. \quad (4)$$

У випадку насичення швидкість утворення радіаційних дефектів буде дорівнювати швидкості їх анігіляції. Слід зауважити, що при насиченні концентрація локалізованих електронів позначається через N . Тоді формула (4) матиме наступний вигляд (5):

$$\beta \cdot E = k \cdot N. \quad (5)$$

Тепер із рівняння (5) виражаємо константу швидкості накопичення, використовуючи концентрацію N локалізованих електронів при насиченні:

$$k = \frac{\beta \cdot E}{N}. \quad (6)$$

Враховуючи, що n — концентрація локалізованих електронів у кварці, швидкість зміни концентрації локалізованих електронів буде дорівнювати першій похідній від концентрації локалізованих електронів та буде визначатися як різниця швидкості утворення радіаційних дефектів в об'ємі та швидкості їх анігіляції. Використовуючи формули (1), (2) та (6), маємо:

$$\frac{dn}{dt} = V_{\alpha, \beta, \gamma} - V_A = \beta \cdot E - \frac{\beta \cdot E}{N} \cdot n. \quad (7)$$

Через вираз $\frac{dn}{dt}$ позначено похідну від концентрації локальних електронів n .

Тобто, ми отримали диференціальне рівняння першого порядку з відокремленими змінними, розв'язавши яке, ми отримуємо рівняння для визначення віку гірської породи. Розв'язуємо диференціальне рівняння (7):

$$\frac{dn}{dt} = \beta \cdot E - \frac{\beta \cdot E}{N} \cdot n.$$

$$\frac{dn}{\beta \cdot E - \frac{\beta \cdot E}{N} \cdot n} = dt.$$

Далі інтегруємо рівняння:

$$T = \int \frac{dn}{\beta \cdot E - \frac{\beta \cdot E}{N} \cdot n} = \left| \frac{\beta \cdot E - \frac{\beta \cdot E}{N} \cdot n = z}{dn = \frac{N}{\beta \cdot E} dz} \right| = \int \frac{N}{\beta \cdot E} \cdot \frac{1}{z} dz = \frac{N}{\beta \cdot E} \ln \left| \beta \cdot E - \frac{\beta \cdot E}{N} \cdot n \right|. \quad (8)$$

Слід зазначити, що верхня границя інтегралу — це накопичена концентрація локалізованих електронів (центрів світіння), а нижня границя інтегралу — це залишкова концентрація електронів після відбілювання.

Далі ми беремо верхню границю інтегралу n_0 та нижню границю інтегралу n_{\min} таким чином:

$$T = \frac{N}{\beta \cdot E} \left[\ln \left(\beta \cdot E - \beta \cdot E \cdot \frac{n_{\min}}{N} \right) - \ln \left(\beta \cdot E - \beta \cdot E \cdot \frac{n_0}{N} \right) \right] = \frac{N}{\beta \cdot E} \ln \frac{1 - \frac{n_{\min}}{N}}{1 - \frac{n_0}{N}}. \quad (9)$$

$$T = \frac{N}{\beta \cdot E} \ln \frac{1 - \frac{n_{\min}}{N}}{1 - \frac{n_0}{N}}. \quad (10)$$

Далі отримуємо рівняння (10) придатне для визначення віку відкладів.

Висновки

У цій роботі розглянуто деякі теоретичні положення термolumінесцентного методу. Нами підкреслено, що метод термolumінесценції є ефективним та точним при встановленні віку гірських порід і мінералів в діапазоні від кількох тисяч років до 600 і більше тисяч років. Даний метод вимірює енергію, накопичену в мінералі, що був «відбілений» в процесі свого формування.

Нам потрібно знати, які процеси відбувалися на досліджуваній території, послідовність накопичення лесово-ґрунтових відкладів, для розуміння тривалої геологічної історії.

Нами запропоновано новий математичний підхід до визначення віку четвертинних відкладів термolumінесцентним методом. Підкреслено, що метод може бути застосований для визначення віку та проведення кореляційних побудов між неоплейстоценовими відкладами різних віддалених районів.

Нами також запропоновано детальне виведення формули для встановлення вікового параметра T , виходячи з річної дози, швидкості утворення радіаційних дефектів та швидкості анігіляції.

Наш новий математичний підхід допомагає встановити геологічну історію формування відкладів.

Нарешті нами зазначено, що термolumінесцентне датування є ефективним і точним методом для вивчення антропогенних відкладів.

Подяки

Робота виконана у рамках наукової бюджетної теми № 1030 «Розробка та апробація стратиграфічної моделі осадових басейнів палеогену, неогену та квартеру України». Автори вдячні рецензентам рукопису за важливі зауваження, поради й коментарі.

References

- Bøtter-Jensen, L., E. Bulur, G. A. T. Duller, A. S. Murray. 2000. Advances in luminescence instrument systems. *Radiation Measurements*, **32**: 523–528.
- Gozhik, P., M. Komar, M. Łanczont, S. Fedorowicz, A. Bogucki, [et al.]. 2014. Paleoenvironmental history of the Middle Dnieper Area from the Dnieper to Weichselian Glaciation: A case study of the Maksymivka loess profile. *Quaternary International*, **334–335**: 94–111.
- Greilich, S., G. A. Glasmacher, G. A. Wagner. 2002. Spatially resolved detection of luminescence: a unique tool for archaeochronometry. *Naturwissenschaften*, **89**: 371–375.
- Greilich, S., G. A. Glasmacher, G. A. Wagner. 2005. Optical dating of granitic stone surfaces. *Archaeometry*, **47** (3): 645–665.
- Komar, M., O. Krokmal, K. Derevska, M. Łanczont, P. Mroczek, [et al.]. 2022. Środowisko i klimat w dolinie Dolnego Dniepru w czasie MIS 64–12 na podstawie danych paleontologicznych. In: J. Skurzyński, Z. Jary, M. Błaszkiwicz (red.). *Północzwartorzędowe środowiska sedymentacyjne Pomorza Wschodniego* (XXVII Konferencja Naukowo-Szkoleniowa Stratygrafia Plejstocenu Polski, Stara Kiszewa, IGiRR UW), Wrocław, 129–131.
- Liritzis, I., A. Vafiadou, N. Zacharias, G. S. Polymeris, R. G. Bednarik. 2013. Advances in surface luminescence dating: new data from selected monuments. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, **13** (3): 105–115.
- Prylypko, S. K., S. I. Alpert. 2019. Mathematical model of the dynamics of accumulation light sum in subareal deposits. *Ideas and innovations in geosciences* (Conference Proceedings). Kyiv, 90–91.
- Singhvi, A. K., V. Mejdahl. 1985. Thermoluminescence dating of sediments. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, **10** (1-2): 137–161.