**1 ІОНІЗУЮЧЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ**

* 1. **Поняття про іонізуюче випромінювання**

**1.1.1 Основні визначення**

Радіаційна безпека – дисципліна, що займається захистом людей і навколишнього середовища від іонізуючого випромінювання.

Іонізуючим називається випромінювання, здатне у достатній мірі іонізувати середовище, крізь котре воно проходить. Тобто, при проходженні іонізуючого випромінювання (ІВ) через будь яку речовину або матеріал, в останньому утворюються заряджені частки – іони. Міра іонізації, яке визначає ІВ залежить від мети дослідження.

Зазвичай до ІВ не відносять ультрафіолетове випромінювання, однак воно (особливо жорстке) має істотний вплив на організм людини, тому розглядається у цьому посібнику.

Під терміном ІВ об’єднані різні за фізичною природою явища. Загальне у них – висока енергія. Саме висока енергія випромінювання обумовлює його іонізуючу здатність, а також біологічну активність.

Всі ІВ поділяються на електромагнітні (квантові, фотонні) та корпускулярні. Перші є потоком електромагнітних хвиль, другі – потоком часток або ядер чи їх фрагментів. До електромагнітних відносяться рентгенівське і гамма-випромінювання, до корпускулярних – альфа і бета-проміні, нейтронне, протонне випромінювання, важкі ядра віддачі.

Всі джерела ІВ можна поділити на дві групи. До першої відносяться спеціальні пристрої, при роботі яких виникає іонізуюче випромінювання. Є два принципово різних види таких пристроїв :

* пристрої, спеціально створені для генерації випромінювання, такі як рентгенівська трубка, прискорювачі часток;
* пристрої, основне призначення яких не стосується генерації випромінювання, а воно виникає як побічний, небажаний ефект (електронно-променева трубка, кенотрони, клістрони).

До другої групи джерел відносяться радіоактивні речовини. Радіоактивність – здатність атомів деяких елементів спонтанно перетворюватись на атоми іншого елементу, випускаючи елементарні частки, фрагменти ядер, гамма-кванти.

Радіоактивність відкрив у [1896 р.](https://uk.wikipedia.org/w/index.php?title=1896_%D1%83_%D0%BD%D0%B0%D1%83%D1%86%D1%96&action=edit&redlink=1) [Антуан Анрі Беккерель](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BD%D1%82%D1%83%D0%B0%D0%BD_%D0%90%D0%BD%D1%80%D1%96_%D0%91%D0%B5%D0%BA%D0%BA%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BB%D1%8C). Беккерель досліджував люмінесценцію солей урану, і, закінчивши роботу, загорнув зразок - мереживну металеву платівку, вкриту урановою сіллю - в чорний, щільний, непрозорий папір і, поклавши її на коробку з фотопластинками, помістив все це в щільно закритий ящик столу. Вийнявши пізніше коробку з фотопластинками, він проявив їх і був спантеличений, виявивши, що вони з якоїсь причини виявилися засвіченими - на фотопластинці проявилося зображення візерункової металевої пластинки. Але чому? Потрапити на пластинки світло свідомо не могло, значить, зрозумів Беккерель, дії були зумовлені якимись іншими променями.

Про те, що існують невидимі для ока, але що викликають почорніння фотопластинки промені, фізики вже знали. За півроку до цього відбулося сенсаційне відкриття Рентгена. Рентгенівські промені стали визначною подією у фізиці. Може бути і з цієї причини доповідь Беккереля 2 березня 1896 року в Паризькій АН була зустрінута з великим інтересом. 12 травня він розповів про зроблене їм відкриття перед ширшою аудиторією, в Музеї природної історії, а потім, в серпні 1900 і на Міжнародному фізичному конгресі, який зібрався в Парижі, щоб обговорити основні підсумки фізики 19 століття. На той час Беккерель вже встиг зрозуміти, що випромінювання не є ні люмінесценцією, ні чим-небудь іншим, уже знайомим фізикам. Воно не змінювалося ні при фізичних (нагрівання, тиск тощо), ні при хімічних впливах, помітити зменшення його інтенсивності не вдавалося і, здавалося, його енергія черпається з невичерпного джерела.

Вже було встановлено, що невідомі промені не тільки викликають почорніння фотопластинок, але і виробляють різноманітні інші дії (включаючи біологічні: на тілі самого Беккереля від препарату, що знаходився в його кишені утворилися виразки, що довго не загоювалися; з тих пір препарати стали поміщатися в свинцеві коробочки).

Було встановлено, що, крім урану, радіоактивність (сам цей термін був введений Марією Кюрі) властива - хоча і в різному ступені - і ряду інших хімічних елементів. Почалися інтенсивні дослідження фізичної природи променів Беккереля, був виявлений (дуже важливий для подальшого) ефект енерговиділення при радіоактивних розпадах, відкрита наведена радіоактивність тощо.

У [1898 р.](https://uk.wikipedia.org/wiki/1898) [Ґергард Шмідт](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D2%90%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B0%D1%80%D0%B4_%D0%A8%D0%BC%D1%96%D0%B4%D1%82) та [П'єр Кюрі](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%8E%D1%80%D1%96_%D0%9F%27%D1%94%D1%80) і [Марія Склодовська-Кюрі](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%8E%D1%80%D1%96_%D0%9C%D0%B0%D1%80%D1%96%D1%8F) відкрили випромінювання [торію](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%BE%D1%80%D1%96%D0%B9). Пізніше Кюрі відкрили [полоній](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%BD%D1%96%D0%B9) та [радій](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B0%D0%B4%D1%96%D0%B9) – теж радіоактивні елементи.

У 1903 році подружжю Кюрі було присуджено [Нобелівську премію](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%BE%D0%B1%D0%B5%D0%BB%D1%96%D0%B2%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B0_%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%BC%D1%96%D1%8F_%D0%B7_%D1%84%D1%96%D0%B7%D0%B8%D0%BA%D0%B8). На сьогодні відомо близько 40 природних елементів, яким властива радіоактивність.

Всі хімічні елементи з [атомним номером](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%BD%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%80), більшим за 83 — радіоактивні.

Природна радіоактивність — спонтанний розпад ядер елементів, що зустрічаються в природі.

Штучна радіоактивність — спонтанний розпад ядер елементів, отриманих штучним шляхом, через відповідні [ядерні реакції](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%AF%D0%B4%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%B0_%D1%80%D0%B5%D0%B0%D0%BA%D1%86%D1%96%D1%8F) [[1]](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4#cite_note-1).

**1.1.2 Види радіоактивного розпаду**

Є декілька типів радіоактивного розпаду.

**Альфа-розпад (α-розпад).** Це вид [радіоактивного розпаду](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B0%D0%B4%D1%96%D0%BE%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) [ядра](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%AF%D0%B4%D1%80%D0%BE_%D0%B0%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0), при якому випромінюються [альфа-частки](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BD%D0%BA%D0%B8) (α) — ядра $ $[2]. При цьому [масове число ядра](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D1%81%D0%BE%D0%B2%D0%B5_%D1%87%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%BE) зменшується на 4, а [атомний номер](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%BD%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%80) на 2.

Приклад альфа-розпаду для [ізотопу](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%86%D0%B7%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%BF) [238U](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D1%80%D0%B0%D0%BD-238) :

$$

Альфа-розпад з основного стану спостерігається тільки у достатньо важких ядер. Альфа-радіоактивні ядра в [таблиці ізотопів](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B0%D0%B1%D0%BB%D0%B8%D1%86%D1%8F_%D1%96%D0%B7%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%BF%D1%96%D0%B2) з'являються починаючи з [атомного номера](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D1%80%D1%8F%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%B5_%D1%87%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%BE) 52 ([телур](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%BB%D1%83%D1%80)) і [масового числа](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D1%81%D0%BE%D0%B2%D0%B5_%D1%87%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%BE) 106–110, а при атомному номері [більше 82](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B0_%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0_%D1%85%D1%96%D0%BC%D1%96%D1%87%D0%BD%D0%B8%D1%85_%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%96%D0%B2) і масовому числі більше 200 практично всі нукліди альфа-радіоактивні, хоча альфа-розпад у них може бути і не домінантним шляхом розпаду.

**Бета-розпад** (**β-розпад**) супроводжується випромінюванням [електронів](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD) e− (β−-розпад) або [позитронів](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%B7%D0%B8%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD) e+ (β+-розпад). При цьому [масове число ядра](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D1%81%D0%BE%D0%B2%D0%B5_%D1%87%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%BE) остається незмінним, а [атомний номер](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%BD%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%80) збільшується на 1 (β−-розпад), або зменшується на 1 (β+-розпад) [3].

При β−-розпаді один [нейтрон](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B5%D0%B9%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD) у складі ядра перетворюється в [протон](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%BD), при цьому вивільняється [електрон](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD) і електронне [антинейтрино](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BD%D1%82%D0%B8%D0%BD%D0%B5%D0%B9%D1%82%D1%80%D0%B8%D0%BD%D0%BE) :

$$$$

При β+-розпаді один протон у складі ядра перетворюється в нейтрон, вивільняючи [позитрон](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%B7%D0%B8%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD) та електронне нейтрино :

$$$$

**Гамма-розпад (γ-розпад).** Гамма-розпад - це випромінювання гамма-квантів ядрами в збудженому стані, при якому вони володіють великою в порівнянні з незбудженим станом енергією. У збуджений стан ядра можуть переходити при ядерних реакціях або при радіоактивних розпадах інших ядер. Збуджений стан ядра позначається буквою m :

$$\rightarrow +γ $$

Гамма-випромінювання найчастіше супроводжує явища альфа- або бета-розпаду. При цьому нове ядро, що виникло у результаті розпаду, спочатку знаходиться в збудженому стані і, коли воно переходить в нормальний стан, то випускає гамма-кванти :

$$\rightarrow $$

**Спонтанний поділ** — різновид [радіоактивного розпаду](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B0%D0%B4%D1%96%D0%BE%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) важких [атомних ядер](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%BD%D0%B5_%D1%8F%D0%B4%D1%80%D0%BE). Спонтанний поділ є [поділом ядра](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%B4%D1%96%D0%BB_%D1%8F%D0%B4%D1%80%D0%B0), який відбувається без зовнішнього збудження (вимушеного поділу), і дає такі ж самі продукти, як і вимушений поділ : осколки (ядра легших елементів) і декілька [нейтронів](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B5%D0%B9%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD) [4] :

$$\rightarrow $$

**Нейтронний розпад** - тип радіоактивного розпаду, властивий нейтронно-надлишковим ядрам :

$$$$

Цей вид розпаду зустрічається рідко. Заряд ядра залишається незмінним, масове число зменшується на 1.

**Протонний розпад -** один з видів радіоактивного розпаду, при якому атомне ядро випускає протон. Протонний розпад може відбуватися з високих збуджених станів в ядрі слідом за бета-розпадом (в цьому випадку процес називається бета-затриманим протонним розпадом) або з основного стану дуже багатих протонами ядер. Приклад :

$$\rightarrow $$

Заряд ядра і масове число зменшуються на 1. Це також рідкий тип розпаду.

**Електронне захоплення** (**захоплення електрону**) — [ядерна реакція](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%AF%D0%B4%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%B0_%D1%80%D0%B5%D0%B0%D0%BA%D1%86%D1%96%D1%8F), під час якої один із [протонів](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%BD) [ядра](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%AF%D0%B4%D1%80%D0%BE_%D0%B0%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0) об'єднується з [електроном](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD) внутрішньої [оболонки атома](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0_%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%BD%D0%BA%D0%B0), утворюючи [нейтрон](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B5%D0%B9%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD). Ця реакція супроводжується випромінюванням [нейтрино](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B5%D0%B9%D1%82%D1%80%D0%B8%D0%BD%D0%BE). Внаслідок цієї реакції [зарядове число](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D1%80%D1%8F%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%B5_%D1%87%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%BE) зменшується на 1, й утворюється ізотоп іншого [хімічного елемента](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A5%D1%96%D0%BC%D1%96%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82) [5] :

$$ν\_{e}^{}$$

**Кла́стерний ро́зпад** — вид [радіоактивного розпаду](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B0%D0%B4%D1%96%D0%BE%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C), який являє собою [явище](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%AF%D0%B2%D0%B8%D1%89%D0%B5) самовільного випромінювання важкими [атомними ядрами](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%AF%D0%B4%D1%80%D0%BE_%D0%B0%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0) ядерних фрагментів (кластерів), важчих ніж [α-частинка](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BD%D0%BA%D0%B0).

Експериментально виявлено 25 ядер від 114Ba до 241Am, що випромінюють з основних станів кластери типу 14С , 20О, 24Ne, 26 Ne, 28Mg, 30Mg ,32Si і 34Si [6]. Наприклад :

223Ra → 14C + 209Pb

**Радіоактивні ряди.** Радіоакти́вні ряди́, радіоакти́вні родини — групи [радіонуклідів](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B0%D0%B4%D1%96%D0%BE%D0%BD%D1%83%D0%BA%D0%BB%D1%96%D0%B4) (радіоактивних [ізотопів](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%86%D0%B7%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%BF)), в яких кожний наступний ізотоп виникає внаслідок [α-](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%B0%D0%B4%D1%96%D0%BE%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C) або [β-розпаду](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) попереднього. Відомі чотири радіоактивні ряди:

* ряд торію  — [232Th](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%BE%D1%80%D1%96%D0%B9-232) → 208Pb;
* ряд радію (ряд урану)  — [238U](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D1%80%D0%B0%D0%BD-238) → 206Pb;
* ряд актинію  — [235U](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D1%80%D0%B0%D0%BD-235) → 207Pb;
* ряд нептунію — [237Np](https://uk.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%9D%D0%B5%D0%BF%D1%82%D1%83%D0%BD%D1%96%D0%B9-237&action=edit&redlink=1) → 205Т1.

Кожний ряд має свого родоначальника – радіоактивний [нуклід](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D1%83%D0%BA%D0%BB%D1%96%D0%B4) і завершується стабільним нуклідом. Перші три ряди існують у природі, останній одержаний штучно.

З отриманням штучних ізотопів ряди були продовжені у напрямку важких ядер, але традиційні назви збереглися. У таблицях 1.1 – 1.4 надані відповідні радіоактивні ряди.

Радіоактивний ряд нуклідів з масовим числом, яке можна подати у вигляді 4n, називається рядом торію. Природний ряд починається з [торію-232](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%BE%D1%80%D1%96%D0%B9-232), що зустрічається у природі, і завершується утворенням стабільного [свинцю-208](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B2%D0%B8%D0%BD%D0%B5%D1%86%D1%8C-208). Штучний довідок починається з ейнштейнію-254.

Таблиця 1.1 – Ряд торію

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Нуклід** | **Вид розпаду** | **Період напіврозпаду** | **Енергія, що виділяється, МеВ** |
| 25499Es | [β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 275,7 діб | 0,084 |
| 254100Fm | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 3,24 год. |  |
| 25298Cf | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 2,645 року | 6,1181 |
| 24896Cm | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 3,4×105 років | 6,260 |
| 24494Pu | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 8×107 років | 4,589 |
| 24092U | [β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 14,1 год | 0,39 |
| 24093Np | [β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 1,032 год | 2,2 |
| 24094Pu | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 6561 рік | 5,1683 |
| 23692U | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 2,3×107 років | 4,494 |
| [23290Th](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%BE%D1%80%D1%96%D0%B9-232) | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 1,405×1010 років | 4,081 |
| 22888Ra | [β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 5,75 років | 0,046 |
| 22889Ac | [β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 6,15 год | 2,124 |
| 22890Th | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 1,9116 роки | 5,520 |
| 22488Ra | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 3,66 дня | 5,789 |
| 22086Rn | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 55,6 с | 6,404 |
| 21684Po | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 0,145 с | 6,906 |
| 21282Pb | [β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 10,64 год | 0,570 |
| 21283Bi | [β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) 64,06 %[α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) 35,94 % | 60,55 хв | 2,2526,208 |
| 21284Po | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 299 нс | 8,955 |
| 20881Tl | [β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 3,053 хв | 4,999 |
| 20882Pb | стабільний |  |  |

Радіоактивний ряд нуклідів з масовим числом, яке можна подати у вигляді 4n + 2, називається рядом радію (іноді називають рядом урану або урану-радію). Природний ряд починається з [урану-238](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D1%80%D0%B0%D0%BD-238) (зустрічається в природі) і завершується утворенням стабільного [свинцю-206](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B2%D0%B8%D0%BD%D0%B5%D1%86%D1%8C-206). У результаті штучних ядерних реакцій було отримано декілька побічних рядів, що зливаються з головними родинами. Головна і побічна родина мають різних родоначальників, але співпадають, починаючи з деякого загального члена. Наприклад, для ряду урану є побічний ряд, що починається з протактинію-230 і зливається з основним рядом на бісмуті-210.

Таблиця 1.2 – Ряд урану (радію).

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Нуклід** | **Вид розпаду** | **Період напіврозпаду** | **Енергія, що виділяється, МеВ** |
| [23892U](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D1%80%D0%B0%D0%BD-238) | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 4,468×109 [років](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%AE%D0%BB%D1%96%D0%B0%D0%BD%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D1%80%D1%96%D0%BA_%28%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%BC%D1%96%D1%8F%29) | 4,270 |
| 23490Th | [β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 24,10 [діб](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%BE%D0%B1%D0%B0) | 0,273 |
| 23491Pam | [β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) 99,84 %[ізомерний перехід](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%86%D0%B7%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%80%D1%96%D1%8F_%D0%B0%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%BD%D0%B8%D1%85_%D1%8F%D0%B4%D0%B5%D1%80) 0,16 % | 1,16 [хв](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A5%D0%B2%D0%B8%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%B0%22%20%5Co%20%22%D0%A5%D0%B2%D0%B8%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%B0) | 2,2710,074 |
| 23491Pa | [β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 6,70 [год](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%22%20%5Co%20%22%D0%93%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0) | 2,197 |
| 23492U | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 245500 років | 4,859 |
| 23090Th | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 75380 років | 4,770 |
| 22688Ra | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 1602 роки | 4,871 |
| 22286Rn | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 3,8235 д | 5,590 |
| 21884Po | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) 99,98 %[β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) 0,02 % | 3,10 [хв](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A5%D0%B2%D0%B8%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%B0%22%20%5Co%20%22%D0%A5%D0%B2%D0%B8%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%B0) | 6,1150,265 |
| 21885At | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) 99,90 %[β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) 0,10 % | 1,5 с | 6,8742,883 |
| 21886Rn | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 35 мс | 7,263 |
| 21482Pb | [β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 26,8 хв | 1,024 |
| 21483Bi | [β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) 99,98 %[α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) 0,02 % | 19,9 хв | 3,2725,617 |
| 21484Po | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 0,1643 мс | 7,883 |
| 21081Tl | [β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 1,30 хв | 5,484 |
| 21082Pb | [β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 22,3 роки | 0,064 |
| 21083Bi | [β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) 99,99987 %[α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) 0,00013 % | 5,013 діб | 1,4265,982 |
| 21084Po | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 138,376 діб | 5,407 |
| 20681Tl | [β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 4,199 хв | 1,533 |
| 20682Pb | - | стабільний | - |

Радіоактивний ряд нуклідів з масовим числом, яке можна подати у вигляді 4n + 3, називається рядом актинію або урану-актинію. Природний ряд починається з [урану-235](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D1%80%D0%B0%D0%BD-235) і завершується утворенням стабільного [свинцю-207](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B2%D0%B8%D0%BD%D0%B5%D1%86%D1%8C-207). Штучний ряд починається з урану-239.

Таблиця 1.3 – Ряд актинію.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Нуклід** | **Вид розпаду** | **Період напіврозпаду** | **Енергія, що виділяється, МеВ** |
| [23992U](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D1%80%D0%B0%D0%BD-235) | [β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 23,5 хв. |  |
| 23993Np | [β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 2,36 діб. |  |
| [23994Pu](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BB%D1%83%D1%82%D0%BE%D0%BD%D1%96%D0%B9-239) | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 2,41×104 років | 5,244 |
| [23592U](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D1%80%D0%B0%D0%BD-235) | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 7,04×108 років | 4,678 |
| 23190Th | [β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 25,52 год | 0,391 |
| 23191Pa | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 32760 років | 5,150 |
| 22789Ac | [β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) 98,62 %[α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) 1,38 % | 21,772 роки | 0,0455,042 |
| 22790Th | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 18,68 діб | 6,147 |
| 22387Fr | [β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) 99,994 %[α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) 0,006 % | 22,00 хв | 1,1495,340 |
| 22388Ra | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 11,43 діб | 5,979 |
| 21985At | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) 97,00 %[β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) 3,00 % | 56 с | 6,2751,700 |
| 21986Rn | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 3,96 с | 6,946 |
| 21583Bi | [β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 7,6 хв | 2,250 |
| 21584Po | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) 99,99977 %[β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) 0,00023 % | 1,781 мс | 7,5270,715 |
| 21585At | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 0,1 мс | 8,178 |
| 21182Pb | [β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 36,1 хв | 1,367 |
| 21183Bi | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) 99,724 %[β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) 0,276 % | 2,14 хв | 6,7510,575 |
| 21184Po | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 516 мс | 7,595 |
| 20781Tl | [β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 4,77 хв | 1,418 |
| 20782Pb |  | стабільний |  |

Радіоактивний ряд нуклідів з масовим числом, яке можна подати у вигляді 4n + 1, називається рядом нептунію. Ряд починається з [нептунію-237](https://uk.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%9D%D0%B5%D0%BF%D1%82%D1%83%D0%BD%D1%96%D0%B9-237&action=edit&redlink=1) і завершується утворенням стабільного [талію-205](https://uk.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%86%D0%B7%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%BF%D0%B8_%D1%82%D0%B0%D0%BB%D1%96%D1%8E&action=edit&redlink=1). В цій серії в природі зустрічається тільки [бісмут-209](https://uk.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%91%D1%96%D1%81%D0%BC%D1%83%D1%82-209&action=edit&redlink=1). Однак з розвитком ядерних технологій в результаті ядерних досліджень і радіаційних аварій в навколишнє середовище потрапили радіонукліди, такі як плутоній-241 та америцій-241, які також можуть бути віднесені за масовим числом до початку ряду нептунію. Слабка α-активність вісмуту-209 була виявлена лише в 2003 році, тому в більш ранніх роботах він називається кінцевим (і єдиним з тих, що збереглися в природі) нуклідом ряду.

Таблиця 1.4 – Ряд нептунію.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Нуклід** | **Вид розпаду** | **Період напіврозпаду** | **Енергія, що виділяється, МеВ** |
| 24998Cf | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 351 рік | 5,813 + 0,388 |
| 24596Cm | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 8500 років | 5,362 + 0,175 |
| 24194Pu | [β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 14,4 років | 0,021 |
| 24195Am | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 432,7 роки | 5,638 |
| 23793Np | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 2,14×106 років | 4,959 |
| 23391Pa | [β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 27,0 д | 0,571 |
| 23392U | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 1,592×105 років | 4,909 |
| 22990Th | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 7340 років | 5,168 |
| 22588Ra | [β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 14,9 д | 0,36 |
| 22589Ac | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 10,0 д | 5,935 |
| 22187Fr | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 4,8 хв | 6,3 |
| 21785At | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 32 мс | 7,0 |
| 21383Bi | [β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) 97,80 %[α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) 2,20 % | 46,5 хв | 1,4235,87 |
| 21384Po | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 3,72 мкс | 8,536 |
| 20981Tl | [β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 2,2 хв | 3,99 |
| 20982Pb | [β−](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%82%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 3,25 роки | 0,644 |
| 20983Bi | [α](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4) | 1,9×1019 років | 3,14 |
| 20581Tl |  | стабільний |  |

**1.1.3 Види ІВ**

**Електромагнітні випромінювання**

Іонізуюча здатність електромагнітного випромінювання залежить від його енергії, яка однозначно визначається довжиною хвилі λ :

*Е= hс/λ,*

де *h* – постійна Планка, *h* = 6,226·10-34Дж·с. Чим менше довжина хвилі, тим більше енергія кванта випромінювання. Цю енергію можна також виразити через частоту, яка пов’язана з довжиною хвилі співвідношенням :

ν= *с/λ,*

де – *с* – швидкість електромагнітних хвиль у вакуумі, *с* = 299 792 458 м/с. Тоді маємо :

*Е=hν*

Одна з класифікацій електромагнітного випромінювання за частотами надана у табл. 1.5.

Стандарт, прийнятий у США, наданий у табл. 1.6.

Радіохвилі та інфрачервоне випромінювання не іонізують середовище, крізь яке вони проходять. Видиме світло може дуже у незначному ступеню іонізувати повітря. Ультрафіолетове випромінювання (УФВ), особливо жорстке, помітно іонізує повітря. Після роботи кварцових ламп відчувається запах озону – наслідок іонізації повітря. Проте іонізуюча здатність ультрафіолетового випромінювання ще не достатня, щоб його вважати повноцінним ІВ. Воно не викликає таких біологічних ефектів, як рентгенівське і гамма-випромінювання (променева хвороба, променеві дерматити), хоча біологічна дія УФВ може бути суттєвою.

Приклади електромагнітних випромінювань :

* змінний струм промислової частоти – ν= 50Гц, *λ* = 6000 км;
* мобільний зв'язок - ν= 1…4 ГГц, λ= 7,5…30 см;
* мікрохвильова піч - ν= 2,45 ГГц, λ= 122 мм;
* пульт телевізора - ν= 214…400 ТГц, λ= 0,75…1,4 мкм;
* проміні зеленого світла - ν= 545…588 ТГц, λ= 510…550 нм.

 Таблиця 1.5 – Класифікація електромагнітних хвиль за частотами

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  **Частотні діапазони** | **частота** |  **Хвильові діапазони** | **Довжина хвилі** | **Енергія** |
| Радіохвилі |
| Вкрай низькі частоти, ВНЧ | 3 - 30 Гц | Декамегаметрові | 105 – 104 км | 12,4-124феВ |
| Наднизькі , ННЧ | 30 – 300 Гц | Мегаметрові | 104 – 103 км | 0,124-1,24пеВ |
| Інфранизькі, ІНЧ | 0,3 - 3 кГц | Гектокілометрові | 1000 - 100 км | 1,24-12,4пеВ |
| Дуже низькі, ДНЧ | 3 - 30 кГц | Міриаметрові (наддовгі) | 100 - 10 км | 12,4-124пеВ |
| Низькі , НЧ | 30 - 300 кГц | Кілометрові (довгі) | 10 - 1 км | 0,124-1,24неВ |
| Середні, СЧ | 0,3 - 3 МГц | Гектометрові (середні) | 1 - 0,1 км | 1,24-12,4неВ |
| Високі, ВЧ | 3 - 30 МГц | Декаметрові (короткі) | 100 - 10 м | 12,4-124неВ |
| Дуже високі, ДВЧ | 30 - 300 МГц | Метрові  | Ультра-короткі | 10 - 1 м | 0,124-1,24мкеВ |
| Ультрависокі,УВЧ | 0,3 - 3 ГГц | Мікрохвильове випромінювання |  Дециметрові | 1 - 0,1 м | 1,24-12,4мкеВ |
| Надвисокі, НВЧ | 3 - 30 ГГц | Сантиметрові | 10 - 1 см | 12,4-124мкеВ |
| Вкрай високі, ВВЧ | 30 - 300 ГГц |  Міліметрові | 10 - 1 мм | 0,124-1,24меВ |
| Гіпервисокі, ГВЧ | 300 - 3000 ГГц | Дециміліметрові (субміліметрові) | 1 - 0,1 мм | 1,24-12,4меВ |
| Оптичний діапазон |
| Інфрачервоні, ІЧВ:далекі | 0,3 – 6 ТГц | Далекий інфрачервоний | 0,05 – 1 мм | 1,24 – 23 меВ |
| середні | 6 – 100 ТГц | Середній нфрачервоний | 3 – 50 мкм | 23 – 400 меВ |
| ближні | 100 – 340 ТГц | Ближній інфрачервоний | 0,78 -3 мкм | 0,4-1,59 еВ |
| Видиме світло | 384 – 789 ТГц | Видимий  | 380 – 780 нм | 1.59 – 3,26 еВ |
| Ультрафіолетові, УФВ : ближні | 0,79 – 1 ПГц | Довгохвильовий | 300– 380 нм | 3,26-4,13 еВ |
| середні | 1-1,5 ПГц | Середньохвильовий | 200 -300 нм | 4,13-6,2 еВ |
| далекі | 1,5-2,46 ПГц | Короткохвильовий | 122– 200 нм | 6,2-10,2 еВ |
| Екстремальні  | 2,48-30 ПГц | Екстремальний (вакуумний) | 10 – 121 нм | 10,2-124 еВ |
| Іонізуючі електромагнітні випромінювання |
| Рентгенівські, РВ :м’які  | 30 – 100 ПГц | Рентгенівський м’який  | 3 – 10 нм |  0,12-0,36кеВ |
| Жорсткі  | 0,1 – 3000 ЕГц | Рентгенівський жорсткий  | 1 пм – 3 нм | 0,36 кеВ- 1,24 МеВ |
| Гамма-промені | 1,5ЕГц- 20 ЙГц | Гамма-діапазон  | 10 зм -0,2 нм -  |  6,2 кеВ- 100 ТЕв |

Таблиця 1.6 – Шкала електромагнітних випромінювань, прийнята у США

 Клас Частота Довжина хв. Енергія фотону



***Ультрафіолетове випромінювання (УФВ)*** частіше не відносять до ІВ. Іноді до іонізуючих відносять жорстке УФВ, а м'яке – не відносять.

УФ-проміні випускаються збудженими атомами при переході у не збуджений стан, а також це складова частина теплового випромінювання тіл, що нагріті до високої температури.

Енергія УФВ складає 3 ... 120 еВ, розподіл на діапазони згідно енергії і довжини хвилі наданий у табл. 1.7.

Часто УФВ з довжиною хвилі більше 200 нм називають м’яким, а з меншою довжиною – жорстким

Таблиця 1.7 – Діапазони ультрафіолетового випромінювання

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Найменування** | **Абревіатура** | **Довжина хвилі, нм** | **Енергія фотону, еВ** |
| **Стандарт ISO**  |
| Близький | NUV | 400 — 300  | 3.10 — 4.13   |
| Середній | MUV | 300 — 200  | 4.13 — 6.20  |
| Далекий | FUV | 200 — 122  | 6.20 — 10.2  |
| Екстремальний (вакуумний) | EUV, XUV | 121 — 10  | 10.2 — 124  |
|  **Розподіл у біології** |
| Ультрафіолет А, довгохвильовий  | UVA | 400 — 315  | 3.10 — 3.94  |
| Ультрафіолет B, середньохвильовий | UVB | 315 — 280  | 3.94 — 4.43  |
| Ультрафіолет С, короткохвильовий | UVC | 280 — 100  | 4.43 — 12.4  |

Проникаюча здатність в повітрі зменшується із зменшенням довжини хвилі. Вакуумні промені взагалі не розповсюджуються в повітрі. В твердих тілах проникаюча здатність УФВ мала - скло затримує промені з λ <350 нм, кварц - λ <180 нм, флюорит - λ <120 нм.

Природне джерело УФВ - Сонце. Довгохвильова частина випромінювання досягає Землі майже повністю. Короткохвильове значною мірою поглинається атмосферою, в основному озоновим шаром.

Штучні джерела м'якого УФВ - електрична дуга, кварцові лампи, бактерицидні лампи, еритемні лампи (для засмаги). Жорстке УФВ генерується ексилампами (ексиплексними лампами), ртутними лампами низького тиску.

**Рентге́нівське випромі́нювання**, або Х-промені ([англ.](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BD%D0%B3%D0%BB%D1%96%D0%B9%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B0_%D0%BC%D0%BE%D0%B2%D0%B0) X-ray emission, roentgen radiation, [нім.](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D1%96%D0%BC%D0%B5%D1%86%D1%8C%D0%BA%D0%B0_%D0%BC%D0%BE%D0%B2%D0%B0) Röntgenstrahlung f) — короткохвильове [електромагнітне випромінювання](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D1%96%D1%82%D0%BD%D0%B0_%D1%85%D0%B2%D0%B8%D0%BB%D1%8F) з [довжиною хвилі](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%BE%D0%B2%D0%B6%D0%B8%D0%BD%D0%B0_%D1%85%D0%B2%D0%B8%D0%BB%D1%96) від 10 [нм](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80) до 1 [пм](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80). Відповідна енергія квантів – 120 еВ …1,2 МеВ. В [електромагнітному спектрі](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D1%96%D1%82%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D1%81%D0%BF%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80) діапазон частот рентгенівського випромінювання лежить між [ультрафіолетом](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D0%BB%D1%8C%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%84%D1%96%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D1%82) та [гамма-променями](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%B0-%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%96).

Рентгенівське випромінювання виникає від різкого гальмування руху швидких [електронів](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD) у [речовині](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B5%D1%87%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%BD%D0%B0), при енергетичних переходах внутрішніх електронів [атома](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%82%D0%BE%D0%BC). Воно використовується у [науці](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B0%D1%83%D0%BA%D0%B0), [техніці](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D1%85%D0%BD%D1%96%D0%BA%D0%B0), [медицині](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D0%B4%D0%B8%D1%86%D0%B8%D0%BD%D0%B0). Рентгенівське випромінювання змінює деякі характеристики гірських порід, наприклад, підвищує їх [електропровідність](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%96%D0%B4%D0%BD%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C). Короткочасне опромінення [кристалів](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%80%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BB) [кам'яної солі](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D0%BC%27%D1%8F%D0%BD%D0%B0_%D1%81%D1%96%D0%BB%D1%8C) знижує їхнє [внутрішнє тертя](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%BD%D1%83%D1%82%D1%80%D1%96%D1%88%D0%BD%D1%94_%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%82%D1%8F).

Назва рентгенівське випромінювання походить від прізвища німецького фізика [Вільгельма Конрада Рентґена](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B5%D0%BD%D1%82%D2%91%D0%B5%D0%BD_%D0%92%D1%96%D0%BB%D1%8C%D0%B3%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BC_%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D1%80%D0%B0%D0%B4).

Рентгенівське випромінювання використовуються для [флюорографії](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BB%D1%8E%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D1%96%D1%8F), рентгеноскопії, [рентгенофлюоресцентного аналізу](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B3%D0%B5%D0%BD%D0%BE%D1%84%D0%BB%D1%8E%D0%BE%D1%80%D0%B5%D1%81%D1%86%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B7), для визначення атомної структури [кристалів](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%80%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BB), при аналізі живописних полотен. Методи дослідження [речовини](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B5%D1%87%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%BD%D0%B0) за допомогою рентгенівських променів об'єднує термін [рентгенівська спектроскопія](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B3%D0%B5%D0%BD%D1%96%D0%B2%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B0_%D1%81%D0%BF%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%BF%D1%96%D1%8F).

Рентгенівське випромінювання одержують за допомогою спеціальних електродних (рентгенівських) ламп, на які подається висока напруга, порядку 50—200 кВ. Електрони, що випускаються розжареним катодом рентгенівської трубки, прискорюються сильним електричним полем в просторі між анодом і катодом і з великою швидкістю ударяються об анод. При цьому з поверхні анода випускається рентгенівське випромінювання, що виходить крізь скло трубки назовні. Якщо енергія електронів менша за енергію іонізації атома катоду, отримуємо гальмівне рентгенівське випромінювання, що має суцільний спектр (рис. 1.1).



 І

Рисунок 1.1 – Спектр гальмівного рентгенівського випромінювання

Рентгенівські трубки з розжареним катодом самі є випрямлячами, і їх можна живити змінним струмом.

Якщо електрони в електричному полі набувають достатньо високу швидкість, щоб проникнути всередину атома анода і вибити один з електронів його внутрішнього шару, то на його місце переходить електрон з більш видаленого шару з випромінюванням кванта великої енергії. Таке рентгенівське випромінювання має строго певні піки довжини хвиль, характерні тільки для даного хімічного елемента, тому воно називається характеристичним (рис. 1.2).

Проникаюча здібність рентгенівських променів росте зі зменшенням довжини хвилі (відповідно зі збільшенням енергії кванту). Рентгенівське випромінювання з довжиною хвилі більше 3 нм вважається м’яким, з меншою довжиною хвилі – жорстким.

***Гамма-промені (γ-промені).***  - [електромагнітне випромінювання](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D1%96%D1%82%D0%BD%D0%B5_%D0%B2%D0%B8%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%BC%D1%96%D0%BD%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F) найвищої [енергії](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D1%96%D1%8F) з [довжиною хвилі](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%BE%D0%B2%D0%B6%D0%B8%D0%BD%D0%B0_%D1%85%D0%B2%D0%B8%D0%BB%D1%96) меншою за 0,1 нм (10 кеВ). Утворюється в реакціях за участю атомних ядер і [елементарних частинок](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B0%D1%80%D0%BD%D0%B0_%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BD%D0%BA%D0%B0) у процесах розпаду, синтезу, [анігіляції](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BD%D1%96%D0%B3%D1%96%D0%BB%D1%8F%D1%86%D1%96%D1%8F), під час гальмування заряджених частинок великої енергії.



Рисунок 1.2 – Спектр характеристичного рентгенівського випромінювання

Гамма-промені мають найбільшу проникність з усіх видів ІВ. Відповідно, від них найважче захиститися. Взаємодія фотонів великих енергій з речовиною слабка. Поглинаючись чи розсіюючись у речовині, гамма-промені передають велику енергію зарядженим частинкам, які відповідають за народження великого числа радіаційних дефектів. Існує три види взаємодії гамма-квантів з речовиною: [фотоефект](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%B5%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82), [комптонівське розсіювання](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D1%82%D0%BE%D0%BD%D1%96%D0%B2%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B5_%D1%80%D0%BE%D0%B7%D1%81%D1%96%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F) і народження електрон-позитронних пар.

Явище фотоефекту залежить від взаємодії електромагнітної хвилі з [електронами](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD) в складі атомів. Велика енергія, а, отже і частота гамма-квантів призводить до зменшення ефективності такої взаємодії, оскільки електрони стають надто [інертними](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%86%D0%BD%D0%B5%D1%80%D1%86%D1%96%D1%8F), щоб реагувати на швидкі зміни [напруженості електричного поля](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B0%D0%BF%D1%80%D1%83%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C_%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D1%8F) хвилі. Тому зі збільшенням енергії гамма-квантів фотоефект, який є основним типом взаємодії гамма-квантів малих енергій з речовиною, дає дедалі менший внесок у процес їхнього поглинання.

За великих енергій гамма-квантів основним каналом поглинання стає народження електрон-позитронних пар. Гамма-квант може утворити електрон-позитронну пару, якщо його енергія принаймні вдвічі перевищує [масу спокою](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D1%81%D0%B0) електрона. В порожньому просторі утворення електрон-позитронної пари неможливо через вимогу одночасного виконання [законів збереження енергії](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD_%D0%B7%D0%B1%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F_%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D1%96%D1%97) та [імпульсу](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD_%D0%B7%D0%B1%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F_%D1%96%D0%BC%D0%BF%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%81%D1%83). Для утворення електрон-позитронної пари потрібне ще одне тіло, яке могло б взяти на себе частину імпульсу, тому народження пар відбувається лише в речовині.

За проміжних енергій гамма-квантів основним шляхом їхньої взаємодії з речовиною є [комптонівське розсіювання](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D1%82%D0%BE%D0%BD%D1%96%D0%B2%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B5_%D1%80%D0%BE%D0%B7%D1%81%D1%96%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F). Воно відрізняється від інших типів взаємодії тим, що розсіюючись на заряджених частинках, гамма-квант не зникає, а віддає лише частину енергії [10].

Гамма-випромінювання (як і рентгенівське) добре затримується матеріалами з великою густиною (свинець, вольфрам). Проникаюча здатність росте зі збільшенням енергії до визначеної межі, потім починає падати. Максимум проникаючої здатності різний для різних речовин. Наприклад, для свинцю Еmax = 5 МеВ, для повітря – 50 МеВ.

Максимальна енергія (і відповідна мінімальна довжина хвилі) гамма-квантів точно не визначена. У результаті ядерних реакцій утворюються гамма-кванти з енергією до 20 МеВ (λ=5,9∙10-14 м = 59 фм), спеціальними методами на прискорювачах досягають енергії 2,4 ГеВ (λ=4,9∙10-16 м = 0,49 фм), у космічних променях завдяки сполохам наднових зірок і випромінюванню нейтронних зірок іноді (досить рідко) зустрічаються кванти з енергією 1 ЗеВ = 1021 еВ (λ= 10-27 м = 0,001 им)[11].

Гамма-промені застосовуються в медицині для терапії і діагностики, для стерилізації харчових продуктів, у контрольно-вимірювальних приладах. Висока проникаюча здатність гамма-випромінювання використовується у гамма-дефектоскопії. [В астрономії](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%B0-%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%BC%D1%96%D1%8F) вивчають космічні об'єкти та процеси за їх гамма-випромінюванням [10].

**Корпускулярні випромінювання**

Корпускулярне випромінювання – це потік частинок, які мають ненульове значення маси спокою. До цього типу випромінювання відносять потоки елементарних частинок - електронів, протонів, нейтронів, позитронів, ядер різних хімічних елементів (гелію, кисню тощо), а також важких ядер віддачі.

***Альфа-промені (α-промені)***- потік позитивно заряджених ядер атомів гелію – альфа-часток. Кожна альфа-частинка складається з 2 [нейтронів](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B5%D0%B9%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD) і 2 [протонів](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%BD).

Альфа-частинки є одним з продуктів спонтанного розпаду [радіоактивних](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B0%D0%B4%D1%96%D0%BE%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C) [ізотопів](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%86%D0%B7%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%BF), таких як [радій](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B0%D0%B4%D1%96%D0%B9) чи [торій](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%BE%D1%80%D1%96%D0%B9). Процес емісії, [альфа-розпад](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4), трансформує один хімічний елемент на інший, знижуючи атомне число(заряд ядра) на два та [атомну масу](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%BD%D0%B0_%D0%BC%D0%B0%D1%81%D0%B0) на чотири. При зіткненнях з атомами середовища новоутворена альфа-частинка сповільнюється, і, врешті-решт, приєднує до себе два електрони, перетворюючись на нейтральний атом гелію [12].

Енергія альфа-часток, що утворилися у результаті радіоактивного розпаду лежить у межах 2…9 МеВ. Альфа-промені високих енергій отримують на прискорювачах.

Завдяки значній кінетичній енергії альфа-частинки дуже інтенсивно взаємодіють з атомами середовища. [Довжина їх пробігу](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%BE%D0%B2%D0%B6%D0%B8%D0%BD%D0%B0_%D0%B2%D1%96%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B1%D1%96%D0%B3%D1%83) у повітрі – декілька сантиметрів, у живих тканинах – декілька десятків мікрометрів.

Пробіг альфа-часток в повітрі при температурі 15ºС і тиску 101,3 кПа можна розрахувати за формулою, м:

 $d=4,76∙10^{-3}\sqrt{E^{3}}$ ,

де Е – енергія часток у МеВ.

Іонізуюча здатність альфа-променів дуже висока – одна альфа частинка утворює декілька десятків тисяч пар іонів на шляху в 1 см у повітрі.

Застосування : медицина (променева терапія, радонові ванни), ізотопні іонізатори, радіонуклідні батареї, детектори диму.

***Бета-промені (β-промені***). Під цією назвою об’єднані два виду випромінювань : β--промені - потік негативно заряджених часток – електронів і β+-промені - потік позитивно заряджених часток - позитронів, які випромінюються при розпаді відповідно бета-мінус або бета-плюс радіоактивних атомних ядер.

Енергії бета-частинок розподілені безперервно від нуля до деякої максимальної енергії, що залежить від виду ізотопу; ця максимальна енергія лежить в діапазоні від 2,5 кеВ (для ренію-187) до десятків МеВ (для короткоживучих ядер) [13].

Джерелами бета-променів можуть також служити спеціальні прилади – електронно-променева трубка, бетатрон (прискорювач електронів до енергії 300 МеВ).

Проникаюча здатність бета-частинок: в повітрі до 18 м, в алюмінії і пластмасі до 7 мм, в біологічних тканинах до 2,5 см. Питома іонізуюча здатність β-частинок менше, ніж α-частинок, але вище, ніж у γ-випромінювання. На шляху 1 см у повітрі електрон або позитрон утворюють декілька десятків пар іонів.

***Нейтронне випромінювання* -** це потік нейтральних частинок, що вилітають з ядер атомів при деяких ядерних реакціях, зокрема при реакціях ділення ядер урану і плутонію. Нейтронне випромінювання виникає при роботі прискорювачів заряджених частинок і атомних реакторів, при ядерних вибухах, що утворюють потужні потоки нейтронів. Один з шляхів вимушеного ділення урану при протіканні ланцюгової ядерної реакції :

$$n+$$

Також нейтронне випромінювання виникає при спонтанному поділі і нейтронному розпаді деяких ізотопів.

Нейтрони, що утворюються при ядерних реакціях, мають велику енергію (1 МеВ і більше) і називаються швидкими. Після проходження крізь шар речовини нейтрони гальмуються, їх енергія знижується до середньої кінетичної енергії атомів речовини (приблизно 0,025 еВ). Такі нейтрони називаються тепловими.

Нейтрони можна класифікувати за енергією більш детально :

Холодні - $<$ 0,025 еВ;

Теплові – 0,025 еВ…0,03 еВ

Повільні - <1 еВ,

Резонансні - 1 еВ…10 кеВ,

Проміжні - 10 кеВ…1 МеВ,

Швидкі: 1 МеВ…100 МеВ,

Релятивістські - > 100 МеВ.

Внаслідок того що нейтрони не мають електричного заряду, нейтронне випромінювання володіє великою проникаючою здатністю. Відмінною особливістю нейтронного випромінювання є здатність перетворювати атоми стабільних елементів у їх радіоактивні ізотопи, що різко підвищує небезпеку нейтронного опромінення [14].

***Протонне випромінювання*** - потік позитивно заряджених ядерних часток - протонів. Вперше протонне випромінювання виявлено в 1886 р у вигляді так званих канальних променів в розрядних трубках. Німецький фізик Гольдштейн за допомогою катодної трубки з перфорованим катодом виявив новий вид випромінювання, яке проникало через отвори в катоді в напрямку, протилежному потоку самих катодних променів. Тому він назвав їх канальними променями. Пізніше Резерфорд ідентифікував цю позитивно заряджену частинку, що входить до складу атома і назвав протоном.

Джерелами інтенсивного протонного випромінювання є прискорювачі заряджених частинок. За допомогою прискорювачів отримані пучки ПВ з енергією в десятки ГеВ. Ще більші енергії ПВ трапляються в космічному просторі. ПВ є основним компонентом галактичного і сонячного космічних випромінювань. Інтенсивні потоки ПВ виявлені у навколоземному просторі - в так званих радіаційних поясах Землі.

Здатність ПВ проникати через шари речовини залежить від енергії пучка протонів і властивостей речовини. ПВ з енергією 10 МеВ здатне пройти шар повітря (при нормальній температурі і тиску) близько 1 м. При збільшенні енергії до 1000 МеВ товщина шару зростає майже до 3 км.

У важких речовинах ПВ затримується більш тонкими шарами. Так, усвинці ПВ з енергією 10 МеВ проходить близько 1/3 мм, а з енергією 1 000 МеВ - дещо менш 60 см. Протонне випромінювання із енергією вище 100 МеВ здатне проникати в тіло на глибину до 10 см і більше.

Щільність іонізації протонами різко зростає в кінці пробігу частинок. Завдяки цій властивості протони зручно використовувати в променевої терапії (див. Протонна терапія) для виборчого опромінення глибоко залягають пухлин (наприклад, гіпофіза). Протони високих енергій мають малий кут розсіювання, що також сприяє локалізації дози в одному місці. Протони високих енергій, котрі долають кулонівське відштовхування, потрапляють в ядро і викликають різні ядерні реакції, в результаті яких утворюються вторинні випромінювання - нейтронне, гамма-випромінювання і ін. В зв'язку з цим при опроміненні речовини протонами високих енергій іонізація середовища відбувається не тільки за рахунок первинних протонів; але і за рахунок вторинних випромінювань. Цю обставину необхідно враховувати при розрахунку доз, створюваних протонним випромінюванням.

При порівняно невеликих енергіях біологічна ефективність протонного випромінювання вище, ніж рентгенівського і гамма-випромінювань. Це пов'язано з більш високою іонізуючої здатністю таких протонів. На відміну від рентгенівського і гамма-випромінювань, протони, проходячи через біологічну тканину, здатні збуджувати ядерні реакції. В результаті ядерних реакцій утворюються вторинні частки, що володіють високою іонізуючої здатністю, що призводить до поглинання в малому обсязі тканини великої кількості енергії і до відповідних локальних уражень тканини. Цією обставиною може бути обумовлено більша антиканцерогенна дія протонного випромінювання в порівнянні з рентгенівськими і гамма-випромінюваннями.

**1.1.4 Наведена радіоактивність**

Наведена радіоактивність — це [радіоактивність](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B0%D0%B4%D1%96%D0%BE%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C) речовин, що виникає внаслідок опромінення їх іонізуючим випромінюванням, зазвичай [нейтронами](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B5%D0%B9%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD).

При опроміненні частинками стабільні ядра можуть перетворюватися на радіоактивні ядра з різним [періодом напіврозпаду](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%BE%D0%B4_%D0%BD%D0%B0%D0%BF%D1%96%D0%B2%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B0%D0%B4%D1%83). Особливо сильна радіоактивність, наведена нейтронним опроміненням. Це можна пояснити властивостями цих частинок: для того, щоб викликати ядерну реакцію з утворенням радіоактивних ядер, [гамма-промені](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%B0-%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%96) та заряджені частинки повинні мати велику енергію (не менш ніж кілька [МеВ](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D1%82)). Однак вони взаємодіють з електронними оболонками атомів набагато інтенсивніше, ніж з ядрами, і швидко втрачають при цьому енергію. Крім того, позитивно заряджені частинки (протони, альфа-частинки) швидко втрачають енергію, пружно розсіюючись на ядрах. Тому ймовірність, що гамма-квант чи заряджена частинка викликає ядерну реакцію, мізерно мала. Наприклад, при бомбардуванні [берилію](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%BB%D1%96%D0%B9) [альфа-частками](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BD%D0%BA%D0%B8) лише одна з кількох тисяч або десятків тисяч (залежно від енергії альфа-частинок) викликає ядерну реакцію, а для інших сполук ця ймовірність ще менша.

Нейтрони ж, навпаки, [захоплюються](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B5%D0%B9%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B5_%D0%B7%D0%B0%D1%85%D0%BE%D0%BF%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F) ядрами при будь-якій енергії, понад те, максимальною є ймовірність захоплення саме нейтронів з низькою енергією. Тому, поширюючись у речовині, нейтрон може потрапляти до безлічі ядер послідовно, поки не буде захоплений черговим ядром, і ймовірність захоплення нейтрона практично дорівнює одиниці.

Слід зауважити, що поглинання нейтронів не обов'язково веде до появи наведеної радіоактивності. Багато ядер можуть захоплювати нейтрон з утворенням стабільних ядер, наприклад [бор-10](https://uk.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%91%D0%BE%D1%80-10&action=edit&redlink=1) може перетворитися на стабільний [бор-11](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%BE%D1%80) (якщо захоплення нейтрона ядром не призведе до утворення літію та альфа-частинки), легкий водень ([протій](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D1%82%D1%96%D0%B9)) — на стабільний [дейтерій](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B5%D0%B9%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B9). У таких випадках наведена радіоактивність не виникає.

Таким чином, найнебезпечніше у відношенні наведеної радіоактивності – нейтронне випромінювання. Альфа-проміні, навіть потужні, можуть викликати слабку, нетривалу наведену радіоактивність.

Процес перетворення стабільних ядер в радіоактивні під дією опромінення називається активацією [15].

При ядерних вибухах, аваріях на АЕС, особливо велике значення має реакція нейтронів з атмосферним азотом-14 :

$$n+$$

Вуглець-14 зазнає β--розпад, в результаті якого утворюється стабільний нуклід 14N :

$$+$ν\_{e}^{-}\_{ }$

Період напіврозпаду цього ізотопу вуглецю – 5700 років.

При випробуваннях ядерної і особливо термоядерної зброї в атмосфері в 1940-1960-х роках вуглець-14 інтенсивно утворювався в результаті опромінення атмосферного азоту тепловими нейтронами від ядерних і термоядерних вибухів. В результаті вміст вуглецю-14 в атмосфері сильно зріс (так званий «бомбовий пік», див. рис. 1.3), однак згодом, із забороною ядерних випробувань, став поступово повертатися до колишніх значень через розчинення у світовому океані [16].