

УДК 539.172.3

В.С.Бохінюк, В.І. Жаба, О.М. Парлаг, Р.М. Плекан, М.М. Пішта

Ужгородський національний університет вул. Волошина, 54, Ужгород, 88000

e-mail: viktorzh@meta.ua, v.parl@yandex.ua, plekanr@rambler.ru

ДОСЛІДЖЕННЯ АКТИВАЦІЙНИХ РІВНІВ У РЕАКЦІЇ (γ, γ')^m НА ЯДРАХ ⁷⁷Se, ⁷⁹Br, ⁸⁹Y, ¹⁰³Rh і ¹¹¹Cd

На наявність зломів проаналізовані енергетичні залежності абсолютних виходів для (γ, γ')^m-реакцій на ядрах ⁷⁷Se, ⁷⁹Br, ⁸⁹Y, ¹⁰³Rh, ¹¹¹Cd. Приведені значення виявлених активаційних рівнів. Розраховані інтегральні перерізи реакцій ⁷⁹Br(γ, γ')^{79m}Br і ⁸⁹Y(γ, γ')^{89m}Y. Вказано, що заселення ізомерних рівнів ^{77m}Se, ^{89m}Y і ^{103m}Rh відбувається з вищих енергетичних метастабільних рівнів. Проведений детальний аналіз заселення ізомеру ^{103m}Rh.

Ключові слова: ізомер, ізотоп, активаційний рівень, переріз, злом.

Вступ

Вивчення енергетичної залежності ефективних перерізів збудження ізомерних станів дає інформацію для з'ясування механізму збудження цих станів. Зокрема, при вивченні виходу ізомерної активності у реакції (γ, γ')^m виявлені активаційні рівні, через які відбувається збудження ізомерних станів. Дослідження ефективних перерізів збудження ізомерних станів та вимірювання ізомерних відношень виходів (ефективних перерізів) фотоядерних реакцій є зручним інструментом для кількісної перевірки наслідків та границі застосовності статистичної теорії ядерних реакцій.

Основною метою більшості робіт по вивченню реакції (γ, γ'), що ведуть до утворення ізомеру, було отримання енергетичної залежності ефективного перерізу реакції у відносно широкому інтервалі енергій 8-25 MeV з відносно великим кроком 0,5-1,0 MeV. Дослідження показали, що поблизу порогу фотонуклонних реакцій (γ, n) і (γ, p) переріз досягає максимуму, а в області гігантського резонансу спочатку спадає, а потім зростає знову [1]. Другий напрямок досліджень - це вимірювання виходів (γ, γ')-реакції у невеликому інтервалі 1,5-6,0 MeV, але з кроком 0,1-0,2 MeV. Точки відхилення енергетичної залежності виходу від монотонно зростаючої кривої дають можливість визначити значення окремих активаційних рівнів або групи рівнів, через які проходить заселення ізомерів ядра.

Активаційні рівні в (γ, γ')^m- реакціях

В період 1990-2010 рр. на мікротроні M-10 УжНУ проводились дослідження реакції $A(\gamma, \gamma')A^m$ на ядрах ⁷⁷Se, ⁷⁹Br, ⁸⁹Y, ¹⁰³Rh, ¹¹¹Cd, ¹³⁷Ba, ¹⁷⁹Hf, ¹⁹⁷Au, ¹⁹⁹Hg. Експериментальна установка і методика експерименту та розрахунки описані в [2-7]. Це дало можливість охопити проміжкову область енергій 5-10 MeV.

У даній роботі наведено результати аналогічних досліджень для (γ, γ')^m-реакцій на середніх (⁷⁷Se, ⁷⁹Br, ⁸⁹Y) і важких (¹⁰³Rh, ¹¹¹Cd) ядрах. У таблиці 1 наведено ядерно-фізичні характеристики досліджуваних ядер [8].

Таблиця 1.

Ядерно-фізичні характеристики досліджуваних ядер

Ядро	Поріг(γ, γ')-реакції, MeV	Поширеність
⁷⁷ Se	-0,17	7,63%
⁷⁹ Br	-0,21	50,69%
⁸⁹ Y	-0,91	100%
¹⁰³ Rh	-0,04	100%
¹¹¹ Cd	-0,4	12,8%

На рис. 1-5 наведені енергетичні залежності абсолютних виходів для даних ядер. Вказані середньоквадратичні похибки для серій із 5-8 незалежних вимірів. Як видно, монотонно зростаючий хід кривих порушується при деяких значеннях енергій. Тому ці енергетичні залежності виходів були проаналізовані на наявність зломів, бо точки зломів відповідають енергетичним рівням ізомеру. Аналіз проводився у статистичному пакеті за допомогою прямих із врахуванням

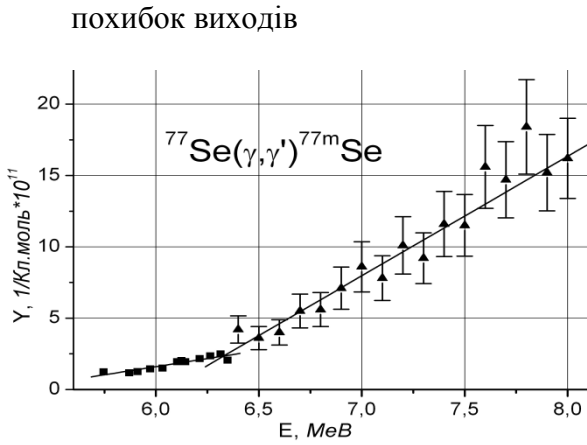


Рис. 1. Енергетична залежність абсолютного виходу для реакції $^{77}\text{Se}(\gamma,\gamma')^{77\text{m}}\text{Se}$.

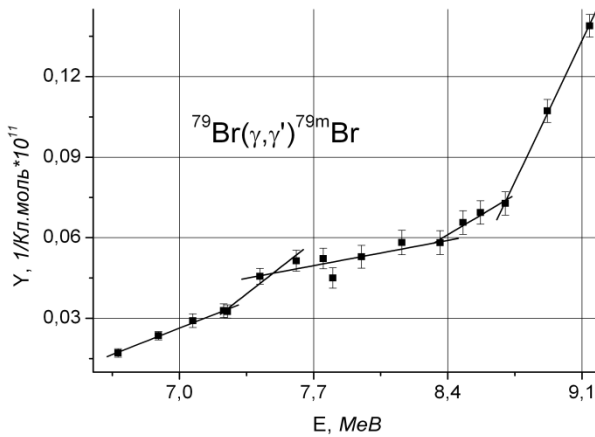


Рис. 2. Енергетична залежність абсолютного виходу для реакції $^{79}\text{Br}(\gamma,\gamma')^{79\text{m}}\text{Br}$.

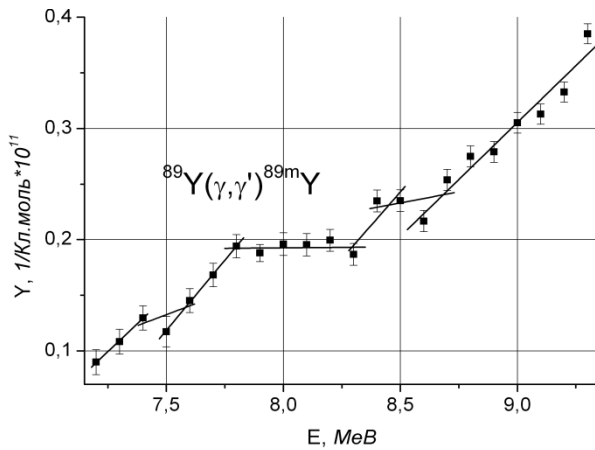


Рис. 3. Енергетична залежність абсолютного виходу для реакції $^{89}\text{Y}(\gamma,\gamma')^{89\text{m}}\text{Y}$.

У таблиці 2 приведено значення виявлених активаційних рівнів для досліджуваних ізотопів ($T_{1/2}$ - період напіврозпаду; J_g , J_m - повний момент ізомерного і основного станів; «+», «-» - парність стану).

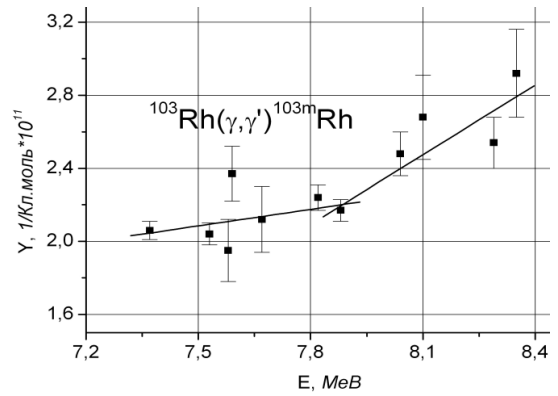


Рис. 4. Енергетична залежність абсолютного виходу для реакції $^{103}\text{Rh}(\gamma,\gamma')^{103\text{m}}\text{Rh}$.

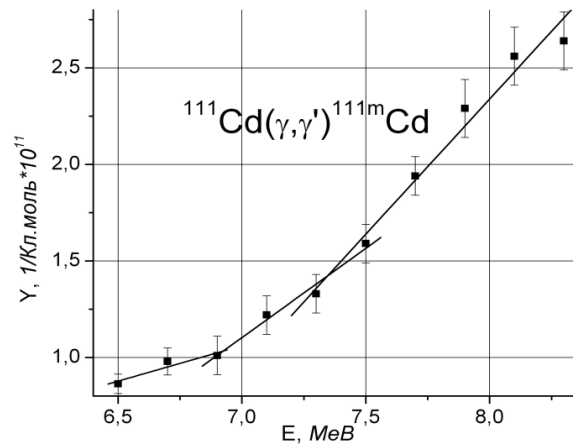


Рис. 5. Енергетична залежність абсолютного виходу для реакції $^{111}\text{Cd}(\gamma,\gamma')^{111\text{m}}\text{Cd}$.

Таблиця 2.

Значення енергій виявлених активаційних рівнів для досліджуваних ізотопів

Ізомер	$T_{1/2}$	J_g	J_m	E_a , MeV
$^{77\text{m}}\text{Se}$	17,36с	1/2-	7/2+	6,32
$^{79\text{m}}\text{Br}$	4,80с	3/2-	9/2+	7,24; 8,35; 8,70
$^{89\text{m}}\text{Y}$	15,66с	1/2-	9/2+	7,58; 8,29; 8,68
$^{103\text{m}}\text{Rh}$	56,1хв	1/2-	7/2+	7,87
$^{111\text{m}}\text{Cd}$	48,5хв	1/2+	11/2-	6,89; 7,35

Для енергій активацій $E_a < 5$ MeV характеристики активаційних рівнів у реакціях $(\gamma,\gamma')^m$ на вищезгаданих ядрах приведено в [1]. Аналіз зломів виходів реакції на наявність активаційних рівнів, проведений в даній роботі, розширив область енергій до 9 MeV.

Також були розраховані інтегральні перерізи реакцій $^{79}\text{Br}(\gamma,\gamma')^{79\text{m}}\text{Br}$ і $^{89}\text{Y}(\gamma,\gamma')^{89\text{m}}\text{Y}$ (рис. 6). Розрахунки проводились за формулою:

$$\sigma_{\text{int}} = \int_{E_p}^{E_m} \sigma(E_\gamma) dE_\gamma = \frac{Y(E_m) \cdot (E_m - E_p)}{\int_{E_p}^{E_m} W(E_m, E_\gamma) dE_\gamma},$$

де $Y(E_m)$ - вихід реакції; $W(E_m, E_\gamma)$ - гальмівний спектр з максимальною енергією E_m ; E_p - енергія ізомерного рівня ядра чи поріг (γ,γ') - реакції.

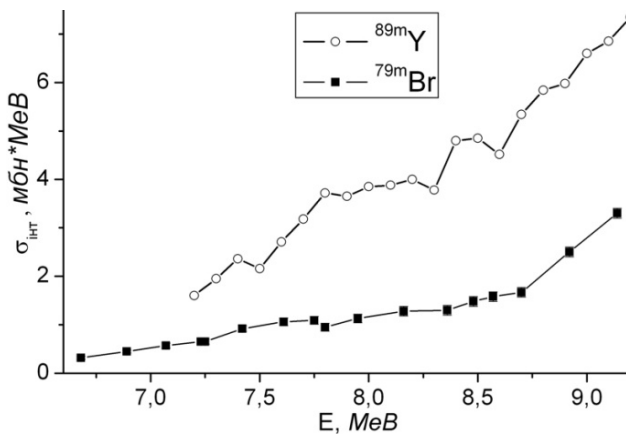


Рис. 6. Інтегральні перерізи реакцій $^{79}\text{Br}(\gamma,\gamma')^{79\text{m}}\text{Br}$ і $^{89}\text{Y}(\gamma,\gamma')^{89\text{m}}\text{Y}$.

Інтегральні перерізи реакцій $^{77}\text{Se}(\gamma,\gamma')^{77\text{m}}\text{Se}$ і $^{111}\text{Cd}(\gamma,\gamma')^{111\text{m}}\text{Cd}$ приведені в роботі [2].

У роботі [9] приведені енергетичні схеми рівнів для ядер ^{77}Se , ^{89}Y і ^{103}Rh , з яких можуть заселятися ізомерні рівні $^{77\text{m}}\text{Se}$, $^{89\text{m}}\text{Y}$ і $^{103\text{m}}\text{Rh}$ з певною імовірністю:

для $^{77\text{m}}\text{Se}$: 824,43; 680,10; 301,14; 249,78; 175,30 кеВ;

для $^{89\text{m}}\text{Y}$: 2622,04; 2566,24; 2529,87 кеВ;

для $^{103\text{m}}\text{Rh}$: 651,79; 650,08; 536,83; 93,04 кеВ.

Дані ж про активаційні рівні для ядер ^{79}Br і ^{111}Cd у роботі [9] відсутні. Це говорить про недостатню вивченість $(\gamma,\gamma')^m$ -реакцій.

Якщо довжина хвилі λ випромінюваних або поглинутих γ -квантів набагато більше, ніж розміри атомного ядра, то для приблизних оцінок співвідношень ймовірностей γ -переходів можна використовувати формули [10]:

$$W(EJ) \approx \frac{1}{\lambda} \left(\frac{R}{\lambda} \right)^{2J}, W(MJ) \approx \frac{1}{\lambda} \left(\frac{R}{\lambda} \right)^{2J+2},$$

де EJ - електричне γ -випромінювання із парністю $P=(-1)^J$; MJ - магнітне γ -випромінювання із парністю $P=(-1)^{J+1}$; R - радіус ядра-випромінювача. Наприклад, для ядра родію переходи з активаційних рівнів на ізомерний рівень $^{103\text{m}}\text{Rh}$ приведено у таблиці 3, де W - ймовірність γ -переходу.

Таблиця 3.

Переходи на ізомерний рівень $^{103\text{m}}\text{Rh}$

$J_m^* \rightarrow J_m$	γ -перехід	W
$(3/2)^+ \rightarrow 7/2^+$		0,107
$(5/2)^+ \rightarrow 7/2^+$	M1+E2	5,750
$5/2^+ \rightarrow 7/2^+$	M1+E2	90,90
$9/2^+ \rightarrow 7/2^+$	M1	0,443

Схематичне зображення заселення ізомеру $^{103\text{m}}\text{Rh}$ вказано на рис. 7. Енергії рівнів приведено в кеВ. Справа від значень енергій рівнів приведено період напіврозпаду метастабільних станів.

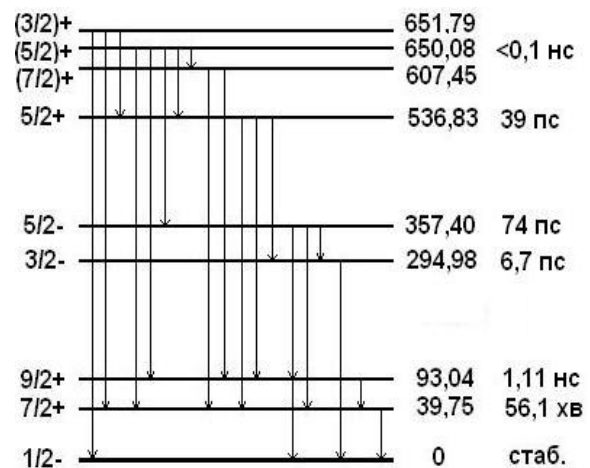


Рис. 7. Заселення ізомерного рівня $^{103\text{m}}\text{Rh}$.

Як бачимо з таблиці 3, найбільш імовірний перехід є $5/2^+ \rightarrow 7/2^+$, тобто з рівня з енергією 536,83 кеВ, причому енергія переходу становитиме 497,08 кеВ.

Схематичне заселення ізомерів $^{77\text{m}}\text{Se}$ і $^{89\text{m}}\text{Y}$ вказано на рис. 8 і 9 відповідно.

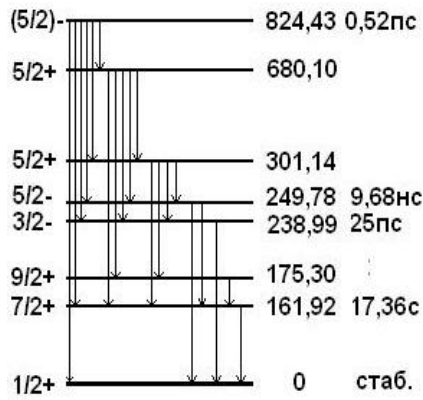


Рис. 8. Заселення ізомерного рівня ^{77m}Se .

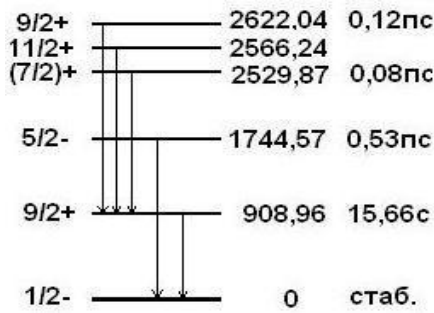


Рис. 9. Заселення ізомерного рівня ^{89m}Y .

Висновки

Проаналізовані залежності абсолютного виходу від енергій для реакцій $(\gamma, \gamma')^m$ -реакції на ядрах ^{77}Se , ^{79}Br , ^{89}Y , ^{103}Rh , ^{111}Cd . Кількість виявлених активаційних рівнів у кожній з цих $(\gamma, \gamma')^m$ -реакцій становить 1-3 значення E_a . Для реакцій $^{79}\text{Br}(\gamma, \gamma')^{79m}\text{Br}$ і $^{89}\text{Y}(\gamma, \gamma')^{89m}\text{Y}$ розраховані інтегральні перерізи. У зв'язку з відсутністю даних у науковій літературі про активаційні рівні для ядер ^{79}Br і ^{111}Cd , з яких можуть заселятися ізомерні рівні ^{79m}Br і ^{111m}Cd , зроблено висновок про недостатню вивченість (γ, γ') -реакцій на цих ядрах. Проаналізовано механізм заселення ізомерів ^{77m}Se , ^{89m}Y і ^{103m}Rh : з певною імовірністю W заселення відбувається з вищих енергетичних метастабільних рівнів.

На наявність зломів доцільним є аналіз енергетичних залежностей абсолютних виходів для $(\gamma, \gamma')^m$ -реакцій на важких ядрах ^{137}Ba , ^{179}Hf , ^{197}Au , ^{199}Hg .

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гангрский Ю.П., Мазур В.М. Рассеяние γ -квантов ядрами и возбуждение изомерных состояний // ФЭЧАЯ. – 2002. – Т. 33.–Вып. №1. – С. 159-200.
2. Гутій А.І., Бохінюк В.С., Окунев О.Г. та ін. Інтегральні перерізи реакцій $^{77}\text{Se}(\gamma, \gamma')^{77m}\text{Se}$, $^{111}\text{Cd}(\gamma, \gamma')^{111m}\text{Cd}$, $^{179}\text{Hf}(\gamma, \gamma')^{179m}\text{Hf}$ // Наук. вісник Ужг. унів. Сер. Фізика. – 2001. – Вип. №9. – С. 50-55.
3. Окунев О.Г., Парлаг О.М., Соколюк І.В. та ін. Збудження ізомерних станів ядер ^{89}Y , $^{107,109}\text{Ag}$ в реакції розсіювання гама-квантів на ядрах // Проблеми економічного та соціального розвитку регіону і практика наукового експерименту. Наук. -техн.збірник, Київ. – 1998. – Вип. №13. – С. 301-303.
4. Окунев А.Г., Парлаг А.М., Соколюк І.В. и др. Возбуждение изомерных состояний ^{89m}Y , $^{107m, 109m}\text{Ag}$ в реакции (γ, γ') в области энергий 7-9.5 МэВ // 5-th International Symposium of nuclear Methods Workshop “Microtron-95”. –Plovdiv, 1995. –P. 23-25.
5. Бохінюк В.С., Окунев О.Г., Парлаг О.М. та ін. Дослідження реакції $^{103}\text{Rh}(\gamma, \gamma')^{103m}\text{Rh}$ // Наук. вісник Ужг. унів. Сер. Фізика. – 2010. – Вип. №27. – С. 29-33.
6. Андреянов В.М., Окунев А.Г., Парлаг А.М. и др. Фотовозбуждение изомеров ^{179m}Hf , ^{79m}Br , ^{137m}Ba , ^{197m}Au в области энергий 4,4-9,5 МэВ // Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра: Тезисы докладов Международного совещания (Харьков, 19-22 апреля 1994г.). – Санкт-Петербург, 1994. –С.218.
7. Бохінюк В.С., Окунев О.Г., Парлаг О.М. та ін. Дослідження ефективного перерізу збудження ізомерного стану ртуті ^{199m}Hg в реакціях (γ, γ') та (γ, n) // Наук. вісник Ужг. унів. Сер. Фізика. –2004. –Вип. №16. – С. 22-25.

8. Варламов В.В., Ишханов Б.С., Комаров С.Ю. Атомные ядра. Основные характеристики: учебное пособие. – М., 2010. – 334 с.
9. Firestone R.B., Chu S.Y.F., Shirley V.S. et al. Table of Isotopes CD-ROM. Eighth Edition, Version 1.0. –California, 1996.
10. Варламов В.В., Гончарова Н.Г., Ишханов Б.С. Физика ядра и банки ядерных данных: учебное пособие. – М.: Универ. книга, 2010. – 246 с.

Стаття надійшла до редакції 10.12.2014

V.S. Bohinyuk, V.I. Zhaba, A.M. Parlag, R.M. Plekan, M.M. Pishta
Uzhhorod National University, Voloshin Str., 54, Uzhhorod, 88000

INVESTIGATION OF ISOMERIC STATES IN THE REACTION $(\gamma, \gamma')^m$ ON NUCLEI ^{77}Se , ^{79}Br , ^{89}Y , ^{103}Rh AND ^{111}Cd

On presence of breaks the energy dependences of absolute outputs of $(\gamma, \gamma')^m$ -reactions on nuclei ^{77}Se , ^{79}Br , ^{89}Y , ^{103}Rh , ^{111}Cd are analyzed. Values of the found activation levels are given. Integrated cross sections of reactions $^{79}\text{Br}(\gamma, \gamma')^{79m}\text{Br}$ and $^{89}\text{Y}(\gamma, \gamma')^{89m}\text{Y}$ are calculated. It is specified that settling of isomeric levels ^{77m}Se , ^{89m}Y and ^{103m}Rh comes from the highest power metastable levels. The detailed analysis of settling of isomer ^{103m}Rh is carried out.
Key words: isomer, isotope, activation level, section, break.

В.С. Бохинюк, В.И. Жабa, А.М. Парлаг, Р.М. Плекaн, М.М. Пиштa
Ужгородский национальный университет, ул. Волошина, 54, Ужгород, 88000

ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВАЦИОННЫХ УРОВНЕЙ В РЕАКЦИИ $(\gamma, \gamma')^m$ НА ЯДРАХ ^{77}Se , ^{79}Br , ^{89}Y , ^{103}Rh И ^{111}Cd

На наличие изломов проанализированы энергетические зависимости абсолютных выходов $(\gamma, \gamma')^m$ -реакций на ядрах ^{77}Se , ^{79}Br , ^{89}Y , ^{103}Rh , ^{111}Cd . Приведены значения обнаруженных активационных уровней. Рассчитаны интегральные сечения реакций $^{79}\text{Br}(\gamma, \gamma')^{79m}\text{Br}$ и $^{89}\text{Y}(\gamma, \gamma')^{89m}\text{Y}$. Указано, что заселение изомерных уровней ^{77m}Se , ^{89m}Y и ^{103m}Rh происходит из высших энергетических метастабильных уровней. Проведен детальный анализ заселения изомера ^{103m}Rh .

Ключевые слова: изомер, изотоп, активационный уровень, сечение, излом.