

КОЗАК В.А., ГЕРЦЮК М.М., НЕЖИНА М.В., КУБАШКО А.В.

**ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА І МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛІЦИКЛІЧНИХ  
АРОМАТИЧНИХ ВУГЛЕВОДНІВ.  
І. ДЖЕРЕЛА ПОХОДЖЕННЯ ТА ЕКОТОКСИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ**

*Узагальнено літературний матеріал з основних фізико-хімічних властивостей поліциклічних ароматичних вуглеводнів, їх класифікація, особливості молекулярно-структурних характеристик та їх вплив на спектральні та адсорбційні властивості. Розглянуто особливості поширення поліциклічних ароматичних вуглеводнів у природних середовищах, їх перетворення та вплив на біосферу, шляхи формування фонових та критично небезпечних концентрацій в об'єктах навколишнього середовища.*

**Ключові слова:** поліциклічні ароматичні вуглеводні, фізико-хімічні властивості, джерела походження, навколишнє природне середовище, огляд.

*Обобщен литературный материал по основным физико-химическим свойствам полициклических ароматических углеводородов, их классификация, особенности молекулярно-структурных характеристик и их влияние на спектральные и адсорбционные свойства. Рассмотрены особенности распространения полициклических ароматических углеводородов в природных средах, их трансформация и влияние на биосферу, пути формирования фоновых и критически опасных концентраций в объектах окружающей среды.*

**Ключевые слова:** полициклические ароматические углеводороды, физико-химические свойства, источники происхождения, окружающая природная среда, обзор.

*Generalize literature on basic physical and chemical properties of polycyclic aromatic hydrocarbons, their classification, features of molecular-structural characteristics and their influence on spectral and adsorption properties. The features of distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in natural environments, their transformation and influence on the biosphere, ways of formation of background and critically dangerous concentrations in the objects of the environment have been considered.*

**Key words:** polycyclic aromatic hydrocarbons, physical and chemical properties, sources of origin, environment, review.

Поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ) – це група вуглеводнів, що містять в своєму складі два або більше шестичленних бензольних циклів. Вони можуть бути поєднані у лінійних, кластерних або кластерно-кутових позиціях. Незважаючи на те, що в природі існує близько 1000 ПАВ (з урахуванням ізомерів та похідних), вивченими та дослідженими є приблизно 200 речовин. Тільки 16 з них відокремлені як пріоритетні забруднювачі та рекомендовані для ідентифікації та визначання в різноманітних об'єктах контролю довкілля. Їх основні фізико-хімічні властивості та молекулярно-структурні особливості наведені в таблиці 1 [1-14].

Загальні характеристики ПАВ – високі температури плавлення та кипіння, і тому за кімнатної температури вони знаходяться в твердому (кристалічному) стані (за винятком деяких ізомерів нафталіну). Температури плавлення та кипіння ПАВ збільшуються зі збільшенням кількості бензольних циклів у структурі речовини. Так, для нафталіну вони становлять 80 °C та 218 °C, а для 3,4-бенз(а)пірену – 178 °C і 496 °C відповідно [12].

Розчинність ПАВ у воді незначна, але суттєво відрізняється у різних вуглеводнів і зменшується для кожного додаткового кільця в структурі ПАВ. Так, розчинність пірену у

воді в тисячу раз більша, ніж у 3,4-бенз(а)пірену, яка для досліджених ПАВ є найменшою. Неорганічні домішки у воді не впливають на розчинність ПАВ, проте їх розчинність у воді збільшується за наявності домішок бензолу, нафталіну або нафтопродуктів. Аналогічно змінюється і тиск насиченої пари. Останні дві характеристики, як правило, зменшуються зі збільшенням молекулярної маси, але одночасно збільшується стійкість цих вуглеводнів до окиснення і відновлення. Для ПАВ характерна не тільки погана розчинність у воді, але й підвищена здатність до сорбції на різноманітних складових екосередовища, особливо в ґрунтах.

Розчинність ПАВ в органічних розчинниках також зменшується зі збільшенням молекулярної маси і залежить від взаємного розташування бензольних циклів в молекулі. Переважна більшість ПАВ є високо ліпофільними речовинами зі значенням  $\text{Log } P_{\text{ow}} > 3$ , тому вони мають властивість до біокумуляції та біомагніфікації. Тобто ПАВ, які не зазнали метаболічних перетворень, накопичуються в жирових тканинах біологічних видів і, таким чином, мають довготривалу токсичну дію на організм.

ПАВ здатні до реакцій приєднання та заміщення, зокрема, до електрофільного заміщення. У такі взаємодії легше вступають менш стабільні вуглеводні. За звичайних умов для ПАВ не характерні реакції приєднання, що можна пояснити особливостями їх електронної структури. Однак за певних умов такі реакції можливі. Наприклад, приєднання галогенів до бензольного кільця відбувається під дією ультрафіолетового (УФ) випромінювання, а приєднання гідрогену з утворенням циклопарафінових вуглеводнів можливе за підвищених температур і під дією каталізаторів [1, 7, 15].

ПАВ здатні до окиснення з утворенням хінонів і карбонових кислот, а також можуть розпадатися під дією сильних концентрованих кислот, електроструму високої частоти, ультразвуку і т.п.

ПАВ проявляють такі фізико-хімічні властивості: світлочутливість, термостійкість, корозійну стійкість. Їм також притаманні магнітні властивості, і вони є напівпровідниками. Слід також зазначити, що ПАВ є фізіологічно активними речовинами, а також привертають все більшу увагу як сировина для барвників, ліків та напівпровідників.




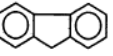
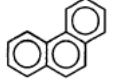
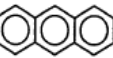
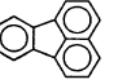

Ще однією характерною властивістю ПАВ є здатність до люмінесценції; вони мають характерні спектри поглинання (збудження) та випромінювання (люмінесценції). Також характерними є спектри УФ-поглинання ПАВ. Кожна кільцева структура має свій унікальний УФ-спектр, тому кожен ізомер має індивідуальний спектр поглинання УФ-випромінювання. Це особливо корисно для ідентифікації ПАВ в різних середовищах.

Сполуки, в яких кожен атом вуглецю належить не більше ніж двом кільцям – катаконденсовані ароматичні сполуки, – можуть існувати у вигляді аценів і фенів. В аценах усі кільця розташовані лінійно (антрацен, нафтацен, пентацен), а у фенах є вигин в системі кілець – дві лінійні системи розташовані під кутом (фенантрен або трифен, тетрафен). У периконденсованих сполуках (наприклад пірені, перилені) один атом вуглецю може належати трьом кільцям.

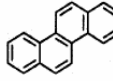
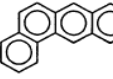
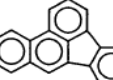
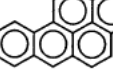
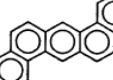
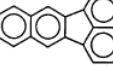
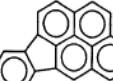
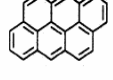
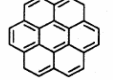
Всі ці сполуки мають три типи смуг поглинання, що розрізняються по інтенсивності в залежності від їх коливальної структури [16]. Кожне додаткове конденсоване ядро зміщує специфічний для ароматичних сполук максимум поглинання в довгохвильову область (батохромний зсув) і підвищує його інтенсивність (гіперхромний ефект). Основна смуга – переходу  $\pi \rightarrow \pi^*$  – потрапляє при цьому в зручну для вимірів область. Прикладом можуть бути УФ-спектри нафталіну в етанолі [ $\lambda_{\text{макс}} = 221 \text{ нм}$  ( $\lg \epsilon = 5,09$ ),  $275 \text{ нм}$  ( $\lg \epsilon = 4,00$ ),  $297 \text{ нм}$  ( $\lg \epsilon = 2,81$ )] і антрацену в етанолі [ $\lambda_{\text{макс}} = 251 \text{ нм}$  ( $\lg \epsilon = 5,30$ ),  $365 \text{ нм}$  ( $\lg \epsilon = 3,88$ )].

Таблиця 1

## Поліциклічні ароматичні вуглеводні, що рекомендовані для визначення

Назва, позначення, хімічна формула і молекулярна маса	Вміст вуглецю, % С	Температура кипіння, °С	Температура плавлення, °С	Розчинність у воді (мг/дм <sup>3</sup> за 25 °С)	Тиск пари (кПа за 25 °С)	Константа Генрі <sup>а)</sup> Па м <sup>3</sup> /моль	Log K <sub>ow</sub> <sup>б)</sup>	Log K <sub>oc</sub> <sup>в)</sup>	Структура
Нафталін, <b>НА</b> , C <sub>10</sub> H <sub>8</sub> , М.м. - 128,17; CAS - 091-20-3	93,75	218	80,28	3,44 x 10 <sup>-3</sup>	10,4 x 10 <sup>-1</sup>	4,83 x 10 <sup>-4</sup>	3,37	2,7 – 3,0	
Аценафтен, <b>АС</b> , C <sub>12</sub> H <sub>10</sub> , М.м. - 154,21; CAS - 083-32-9	93,05	265	96	3,74 x 10 <sup>-4</sup>	30,0 x 10 <sup>-3</sup>	1,55 x 10 <sup>-4</sup>	3,92	3,3 – 3,6	
Аценафталін, <b>АСН</b> , C <sub>12</sub> H <sub>8</sub> , М.м. - 152,20; CAS - 208-96-8	93,25	275	93	3,93 x 10 <sup>-4</sup>	6,8 x 10 <sup>-4</sup>	1,13 x 10 <sup>-5</sup>	3,9 – 4,1	3,75	
Флуорен, <b>FL</b> , C <sub>13</sub> H <sub>10</sub> , М.м. - 166,22; CAS - 086-73-7	93,59	295	114,77	1,98 x 10 <sup>-4</sup>	9,0 x 10 <sup>-4</sup>	6,34x10 <sup>-5</sup> –1,0x10 <sup>-4</sup>	4,18	3,45 – 3,95	
Фенантрен, <b>PHE</b> , C <sub>14</sub> H <sub>10</sub> , М.м. - 178,23; CAS - 085-01-8	94,05	339	101	1,0 x 10 <sup>-4</sup>	2,0 x 10 <sup>-4</sup>	2,33 x 10 <sup>-5</sup>	4,46 – 4,55	3,4 – 4,3	
Антрацен, <b>АН</b> , C <sub>14</sub> H <sub>10</sub> , М.м. - 178,23; CAS - 120-12-7	94,05	547	246	1,399 x 10 <sup>-10</sup>	1,0 x 10 <sup>-5</sup>	1,93x10 <sup>-5</sup> –6,5x10 <sup>-5</sup>	4,45 – 4,55	4,2 – 4,4	
Флуорантен, <b>ФА</b> , C <sub>16</sub> H <sub>10</sub> , М.м. - 202,26; CAS - 206-44-0	95,00	375	110	1,9 x 10 <sup>-5</sup>	1,2 x 10 <sup>-5</sup>	1,3x10 <sup>-5</sup> –1,6x10 <sup>-5</sup>	4,95	4,62	
Пірен, <b>PY</b> , C <sub>16</sub> H <sub>10</sub> , М.м. - 202,26; CAS - 129-00-0	95,00	402	148	1,313 x 10 <sup>-5</sup>	6,0 x 10 <sup>-6</sup>	1,1 x 10 <sup>-5</sup>	4,88 – 5,18	4,6 – 5,1	

Продовження таблиці 1

Хризен, <b>CHR</b> , C <sub>18</sub> H <sub>12</sub> , М.м. - 228,29; CAS - 218-01-9	94,45	448	253,8	1,399 x 10 <sup>-7</sup>	5,7 x 10 <sup>-9</sup>	9,46 x 10 <sup>-5</sup>	5,7	5,1	
Бенз(а)антрацен, <b>B(a)A</b> , C <sub>18</sub> H <sub>12</sub> , М.м. - 228,29; CAS - 056-55-3	94,45	400	160,5	9,4 x 10 <sup>-7</sup>	1,5 x 10 <sup>-8</sup>	3,35 x 10 <sup>-6</sup>	5,7	5,3	
Бенз(б)флуорантен, <b>B(b)F</b> , C <sub>20</sub> H <sub>12</sub> , М.м. - 252,32; CAS - 205-99-2	95, 20	481	168	1,5 x 10 <sup>-7</sup>	6,7 x 10 <sup>-8</sup>	1,11 x 10 <sup>-4</sup>	6,2	5,2	
Бенз(а)пірен, <b>B(a)P</b> , C <sub>20</sub> H <sub>12</sub> , М.м. - 252,32; CAS - 050-32-8	95, 20	496	178,1	9,4 x 10 <sup>-7</sup>	7,3 x 10 <sup>-10</sup>	1,31 x 10 <sup>-6</sup>	5,97 – 6,58	6,0 – 6,7	
Дібенз(а,h)антрацен, <b>D(ah)A</b> C <sub>22</sub> H <sub>14</sub> , М.м. - 278,35; CAS - 053-70-3	94,70	524	266,6	5,0 x 10 <sup>-8</sup>	1,3 x 10 <sup>-11</sup>	1,47 x 10 <sup>-8</sup>	6,5 – 6,69	5,8 – 6,5	
Бенз(к)флуорантен, <b>B(k)F</b> , C <sub>20</sub> H <sub>12</sub> , М.м. - 252,32; CAS - 207-08-9	95,20	480	215,7	8,0 x 10 <sup>-8</sup>	2,1 x 10 <sup>-8</sup>	8,29 x 10 <sup>-7</sup>	6,2	4,3	
Індено(1,2,3-с,d)пірен, <b>IP</b> , C <sub>22</sub> H <sub>12</sub> , М.м. - 276,34; CAS - 193-39-5	95,60	550	278	2,6 x 10 <sup>-8</sup>	1,3 x 10 <sup>-11</sup>	1,41 x 10 <sup>-7</sup>	6,7	5,61	
Антрацен <sup>г)</sup> , <b>ANT</b> , C <sub>22</sub> H <sub>12</sub> , М.м. - 276,34; CAS - 191-26-4	95,60	547	246	1,0 x 10 <sup>-8</sup>	приблизно 10 <sup>-10</sup> (розрахунок)	5,64 x 10 <sup>-6</sup>	6,33 – 7,04	–	
Коронен <sup>г)</sup> , <b>COR</b> , C <sub>24</sub> H <sub>12</sub> , М.м. - 300,35; CAS - 191-07-1	96,00	525	від 438 до 440	5,4 x 10 <sup>-8</sup>	2,0 x 10 <sup>-13</sup>	0,14 x 10 <sup>-6</sup>	6, 92	–	

Примітка: а – характеризує залежність ад(аб)сорбованої речовини від її концентрації (парціального тиску);

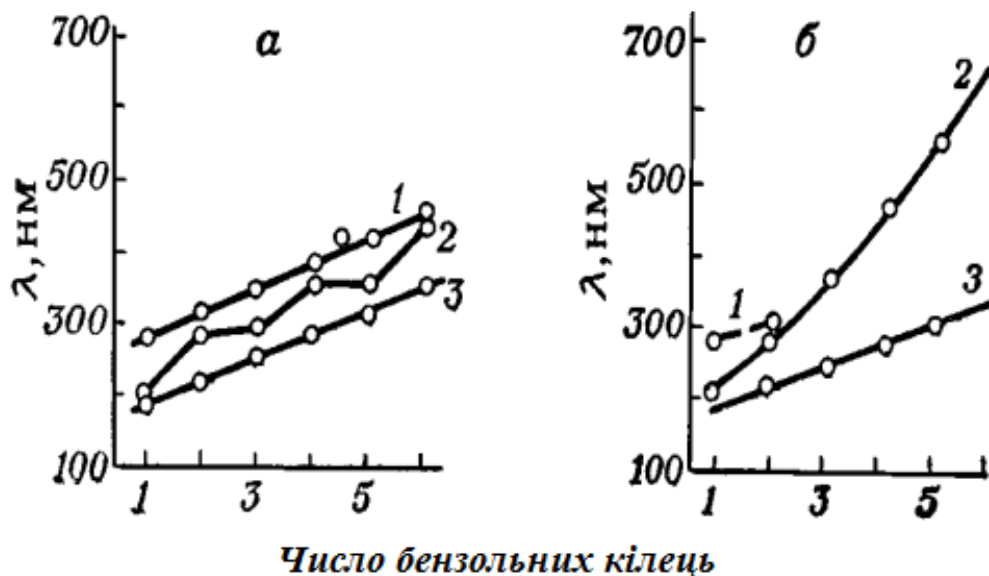
б – коефіцієнт розподілення в системі октанол-вода (характеризує здатність органічних речовин щодо адсорбції);

в – коефіцієнт розподілення в системі вода-органічний вуглець (тобто між водною фазою та адсорбентом);

г – вуглеводні, рекомендовані для визначення World Health Organization.

Для сполук типу аценів  $\alpha$  і  $\beta$  смуги зміщуються приблизно однаково при збільшенні числа кілець, а для речовин із заміщенням в пара-положенні ці зміщення смуг поглинання є значно характернішими. В результаті, вже починаючи з антрацену, слабка  $\alpha$ -смуга виявляється закритою накладеною на неї інтенсивною пара-смугою і не спостерігається в спектрі.

Для речовин типу фенів всі три смуги зміщуються приблизно однаково і спостерігаються аж до більш конденсованих речовин цього ряду. На рис. 1 наведена залежність положення смуг поглинання від числа конденсованих кілець.



**Рис. 1.** Залежність положення смуг поглинання для ароматичних вуглеводнів від числа конденсованих кілець в фенолах (а) і аценах (б): 1 –  $\alpha$ -смуга; 2 – пара-смуга; 3 –  $\beta$ -смуга

Угрупування, що сприяють делокалізації  $\pi$ -електронної системи ПАВ, індукують додатковий батохромний зсув, величина якого залежить від положення цього угруповання. Так, для спектрів 1-метилнафталіну [ $\lambda_{\text{макс}} = 223$  нм ( $\lg \epsilon = 4,97$ ), 272 нм ( $\lg \epsilon = 3,97$ ), 282 нм ( $\lg \epsilon = 3,94$ ), 293 нм ( $\lg \epsilon = 3,91$ ), 312 нм ( $\lg \epsilon = 2,90$ )] і 2-метилнафталіну [ $\lambda_{\text{макс}} = 224$  нм ( $\lg \epsilon = 3,98$ ), 276 нм ( $\lg \epsilon = 3,91$ ), 285 нм ( $\lg \epsilon = 3,84$ ), 305 нм ( $\lg \epsilon = 2,93$ ), 320 нм ( $\lg \epsilon = 2,92$ )] притаманні хоча і невеликі, але характерні відмінності, що відображають зміни в розподілі електронної густини в молекулах цих сполук.

Висока індивідуальність спектрів конденсованих ПАВ, а також вивчення електронних спектрів поглинання і випромінювання, що знаходяться у видимій та ультрафіолетовій частинах спектра, дозволяє широко використовувати їх при дослідженні цих речовин [17-21].

### Джерела походження ПАВ

ПАВ широко розповсюджені в природному середовищі. Доведено їх наявність в геологічних відкладеннях, ґрунті, повітрі, воді та придонних осадах, біологічних тканинах [22]. ПАВ знаходять у галактичному просторі, кометах, метеоритах, вони також є головними молекулярними маркерами для найбільш ранніх форм біологічного життя і геохімічних процесів [23-27]. Ще в кінці XIX століття було відкрито наявність органічних речовин в

метеоритах, а вже пізніше виявлено присутність в природних об'єктах досить поширених ПАВ – 3,4-бенз(а)пірена, коронена, антрацена та деяких інших і доведено їх абіогенне утворення із CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> та з інших речовин [28].

Як відомо, існують такі способи генезису ПАВ: пірогенний (утворення під час різноманітних процесів горіння, зокрема і побутових відходів), петрогенний (утворення в результаті геохімічних процесів за участю вуглеводнів) та біогенний (утворення певними рослинами і бактеріями або під час деградації вегетативної речовини) [29-32].

Отже, основними джерелами надходження ПАВ в навколишнє середовище є:

1. екзогенний (космогенний);
2. ендегенний: а) антропогенний (переважно техногенний (пірогенний));  
б) геологічний (петрогенний);  
в) біогеохімічний.

Зазвичай ПАВ утворюються в процесі розкладу органічних речовин за температури 650-900 °С та нестачі кисню. Склад і структура таких ПАВ залежать від вихідної сировини і від температури їх утворення.

Необхідно зазначити, що природні ПАВ при певних концентраціях не становлять реальної загрози для об'єктів навколишнього середовища.

За реальних умов природні ПАВ утворюються під дією глибинних теплових потоків ядра Землі на органічні речовини в її надрах. Склад таких ПАВ залежить від потужності та довготривалості теплового потоку, властивостей та каталітичної активності породи і типу органічної речовини. Інші ПАВ утворюються в результаті вулканічної активності. Встановлено [33-38], що за сучасного рівня вулканічної активності щорічно в біосферу Землі надходить приблизно 24 тони ПАВ з попелом вулканів та декілька сотень тон з лавою виверження.

До джерел утворення природних ПАВ в осадових породах та ґрунті можна віднести і лісові пожежі – сучасні і ті, що відбувалися в минулі геологічні епохи. До цього переліку доцільно також додати грязеві викиди, витіки гідротермальних джерел, аномалії тектонічно активних зон, нафтові просочення та ерозію осадових порід, що містять вуглеводні.

Всі вищенаведені джерела походження ПАВ пов'язані зі способом їх утворення під високотемпературним впливом, причому ПАВ, утворені природним шляхом, майже не відрізняються від ПАВ антропогенного походження.

Утворення ПАВ відбувається і в ґрунтах з похованою біотою давніх і сучасних горизонтів відкладень. Через це в біосферу Землі щорічно потрапляє приблизно до 1000 тон ПАВ.

Механізм утворення вуглеводнів під впливом вулканічної і гідротермальної активності земної кори полягає в поступовій абіогенній поліконденсації простих органічних речовин, що призводить до наступного ускладнення і укрупнення молекул. В тектонічно активних зонах, особливо в місцях виходу (магми, термальних джерел, ін.), де знаходяться біологічні поховання, можливий ще один спосіб утворення ПАВ: їх генерація в процесі деструкції органічної речовини під дією високої температури при нестачі кисню (піроліз).

Як видно з табл. 1, ПАВ мають відносну фізико-хімічну інертність і тому можуть бути індикаторами процесів ґрунтоутворення. Актуальним є вивчення ПАВ в ґрунтах і осадах, оскільки ступінь забруднення цими речовинами є надзвичайно високим [37, 39].

ПАВ відіграють важливу роль при вивченні геохімічного походження нафти, їх наявність дуже характерна для осадових гірських порід нафто-газових регіонів [39-43]. Вони

також присутні в сучасних (четвертинних), зокрема морських та океанічних відкладеннях. Аномально підвищений вміст ПАВ в породах і наявність в їх складі незаміщених гомологів характерна, зокрема, для таких регіонів, де поблизу є нафто-газові поклади або розривні порушення земної кори. Багаторічні дослідження геохімії ПАВ в природних процесах дозволили зробити висновок, що ПАВ – гарні геохімічні індикатори, які визначають напрямки потоків вуглеводнів в геохімічній структурі ландшафту [44].

ПАВ, що формуються під час дозрівання сирової нафти чи аналогічних процесів, називаються петрогенними. Одним з основних джерел петрогенних ПАВ є розливи нафти, витоки підземних і надземних сховищ та накопичення величезної кількості викидів від згорання бензину в двигунах внутрішнього згорання, моторних оливо та пов'язаних з ними речовин під час їх зберігання або транспортування.

Антропогенні пірогенні ПАВ є продуктами піролізу органічних речовин (нафти, вугілля, торфу, сланців тощо), які утворюються за підвищених температур (від 350 °C до 1200 °C) та нестачі кисню (піроліз), або у випадку неповного згорання (нестача кисню у мікрообластях повітряно-паливної суміші).

Найбільш інтенсивно такі процеси проходять за температури біля 700°C, при цьому ПАВ надходять до екосистеми навколишнього середовища у вигляді сажі (речовини неповного згорання), в ад(аб)сорбованому вигляді на поверхні твердих часток пилу оксидів або солей металів, у вигляді аерозольних утворень.

Ідентифікація вмісту ПАВ ґрунтується, головним чином, на вивченні реальних об'єктів довкілля. Це можна зробити досліджуючи і аналізуючи дані щодо вмісту конкретних органічних речовин в багатьох зразках. Такі методи ідентифікації джерел часто доповнюють дослідженнями, пов'язаними зі створенням загальних «фонових» діапазонів ПАВ в навколишньому середовищі [45].

Температура утворення ПАВ може забезпечити ключ до ідентифікації їх джерел. За високих температур утворюються переважно незаміщені ПАВ, тобто речовини з меншою кількістю алкілованих ланцюгів, проте за середніх та низьких температур окрім незаміщених ПАВ утворюються також заміщені похідні, в основному ПАВ з короткими алкільними боковими ланцюгами.

Так, ПАВ, що були ідентифіковані в стічних водах електростанції (формувався за дуже високих температур), мають структуру, відмінну від ПАВ, що були виявлені в місцях розливу нафти або нафтопродуктів та інших ПАВ, які формувався переважно за більш низьких температур протягом мільйонів років [46].

Іншим методом, що використовується для виявлення відмінності пірогенних ПАВ від петрогенних, є вивчення наявності та кількості п'ятичленних вуглеводневих циклів в структурі ПАВ. Структури з п'ятичленими кільцями більш характерні для вуглеводнів нафтового походження, ніж для ПАВ, ідентифікованих у речовинах пірогенного походження, оскільки великий час утворення нафтових вуглеводнів сприяє процесу перетворення кілець на п'ятичленні.

Під час природних процесів (наприклад, абіогенного синтезу – без залучення біомаси) можливе утворення і перетворення органічних речовин за високою (біля 1000°C) та середньою (400 – 500°C) температурою, а з іншої сторони – за відносно низькою (100 – 150°C) температурою. Абіогенний процес за високих і середніх температур призводить до синтезу ПАВ, структура яких майже не відрізняється від структури ПАВ, що утворюються з антропогенних джерел. При низькотемпературному процесі утворюються аріл- та алкіл-

похідні ароматичних вуглеводнів зі значним заміщенням як безпосередньо в самому ароматичному кільці, так і алкіл-заміщені ПАВ з довгими вуглеводневими ланцюгами. Для того, щоб за умов низькотемпературного процесу відбулося розкладання органічних речовин і утворення ПАВ, потрібний дуже великий проміжок часу, який іноді обчислюється геологічними епохами.

Вихідний матеріал для вуглеводнів, що утворюються піролітичним способом (за високих температур), швидко перетворюється в ПАВ з більш стабільними шестичленними кільцями [29].

Основними антропогенними джерелами утворення ПАВ є:

1. Техногенні:

- стаціонарні – промислові викиди від коксохімічних, металургійних, нафтопереробних та інших промислових виробництв (виробництво алюмінію та паперу); підприємства з виробництва тепла і електроенергії; розливи нафтопродуктів, шлам стічних вод та відходи твердих або креозотних відвалів;

- мобільні – автомобільний транспорт, авіація, водний транспорт та інші пересувні агрегати і механізми;

2. Куріння.

Важливо зазначити, що неповне згорання, як природне, так і антропогенне, дає найбільший внесок щодо надходжень ПАВ до навколишнього середовища [47].

Поміж промислових підприємств на першому місці за викидами ПАВ, зокрема і бенз(а)пірена, знаходяться комбінати з виробництва алюмінію та заводи з виробництва технічного вуглецю та коксу. Більше половини емісії ПАВ, що потрапляє в навколишнє середовище, припадає на виробництво енергії і на промислові викиди від підприємств, які використовують для спалювання вугілля.

Вагомий внесок в забруднення навколишнього середовища дають вихлопні гази автотранспорту, авіації, залізничного транспорту (зокрема транспорту, який працює на дизельному пальному). Транспорт на сьогодні є потужним джерелом забруднення довкілля ПАВ. Доведено, що тільки за одну хвилину роботи газотурбінного двигуна від сучасного літака викидається в атмосферу 2-4 мг 3,4-бенз(а)пірена, а за рік це приблизно 5000 тон.

У відпрацьованих газах двигунів внутрішнього згорання транспортних засобів ідентифіковано більше 60 органічних речовин – це переважно незаміщені ПАВ і 3,4-бенз(а)пірен [48], а також інші менш токсичні – бенз(а)антрацен, бензфлуорантен, дибензантрацен та їх нітропохідні, які мають надзвичайну високу мутагенну і канцерогенну активність.

Значна кількість ПАВ із забрудненого ґрунту переноситься в подальшому зливними і паводковими водами до річок, озер та попадає до глибинних водних горизонтів [49]. Деяка частина ПАВ накопичується в придонних відкладеннях і поступово знову потрапляє до водних горизонтів і поверхневих вод. Канцегоренні ПАВ із ґрунту, води та повітря частково переходять до рослин, тварин, риб, а потім і до організму людини або безпосередньо, або як складова домішка в продуктах харчування.

### **Екотоксикологічні ефекти ПАВ**

Поліциклічні ароматичні вуглеводні, зокрема 3,4-бензпірен, є стійкими токсичними забруднювачами довкілля. Вони небезпечні тим, що мають змінну та комбінаторну



активність, яка призводить до виникнення канцерогенних, тератогенних або мутагенних змін в організмі.

В залежності від умов дії, ПАВ сприяють виникненню мутагенезу, тератогенезу та уповільненню або інгибування росту, пришвидшують старіння, токсикогенез, порушують роботу імунної системи, що призводить як до розладів індивідуального розвитку та зміни генофонду, так і до небажаних відхилень у біогеоценозах [27, 50-51].

За шкалою безпеки відносно навколишнього середовища (від 0 до 3) ПАВ мають значення 1,5. Чинники, які приймалися до розрахунку, включали оцінку ступеня токсичності або нетоксичності, збереження активності ПАВ у навколишньому середовищі та їх здатність до акумулювання в живих організмах.

Екологічні і токсикологічні ефекти впливу ПАВ на об'єкти навколишнього середовища проявляються по різному в залежності від молекулярної маси та структури ПАВ.

Незаміщені ПАВ з низькою молекулярною масою і вмістом 2-3 ароматичних циклів є відносно токсичними або дають небажані впливи на деякі організми, але не є канцерогенними речовинами. ПАВ з більш високою молекулярною масою, що мають у своїй структурі від 4 до 7 ароматичних циклів, є не такими токсичними, але надзвичайно канцерогенні, тератогенні або мутагенні щодо живих організмів [7, 52].

ПАВ включені Парламентом Європейського співтовариства [53] та Управлінням з охорони навколишнього середовища США (U.S. Environmental Protection Agency, US EPA) до переліку пріоритетних забруднювачів довкілля [54, 55].

Якщо не брати до уваги курців тютюну та людей, які працюють на підприємствах зі шкідливими умовами праці, можна стверджувати, що основна частина населення планети піддається впливу ПАВ головним чином через атмосферне повітря, воду та харчі [56-58]. Із водного середовища ПАВ стають біодоступними через флору і фауну водойм, через речовини які переносяться водою та через забруднення донних відкладень [59].

Оскільки ПАВ відносяться до ліпофільних хімічних речовин (значення  $\text{Log } P_{\text{ow}} > 3$ ), то вони легко проходять через ліпідні мембрани і здатні накопичуватися в живих організмах. Виявлено, що вміст ідентифікованих ПАВ у рибах і молюсках є набагато вищим, ніж у навколишньому середовищі, з якого вони потрапили. Біоаккумуляція також характерно для наземних безхребетних. Біодоступність цих речовин є значною після їх потрапляння всередину організму через їжу або інгаляційним шляхом з атмосферного повітря.

Наукові дослідження показали, що ПАВ зустрічаються майже в усіх внутрішніх органах біологічних видів, особливо в тих, які багаті на жирову тканину. Такі органи слугують «сховищами», з яких ПАВ можуть поступово вивільнятися.

Токсичність ПАВ по відношенню до риб і птахів коливається від помірної до високої. Деякі ПАВ призводять до збитків або навіть загибелі сільськогосподарських зернових культур. В ґрунті вони навряд чи мають токсичну дію на наземних безхребетних, за винятком випадків, коли ґрунт сильно забруднений.

Однак рослини можуть поглинати ПАВ із ґрунтів через своє коріння і транспортувати їх у інші свої частини. Швидкість надходження ПАВ зазвичай залежить від концентрації, водорозчинності та їх фізико-хімічного стану, а також від типу ґрунту. Вплив ідентифікованих ПАВ на розвиток фітотоксичних ефектів зустрічається рідко. Повна інформація і база даних з цього питання на сьогодні все ще обмежена. Деякі рослини містять речовини, які здатні захистити їх від негативного впливу ПАВ. Інші рослини можуть синтезувати ПАВ, або вони діють як гормони росту [60].

Як тільки ПАВ потрапляють до живих клітин, вони призводять до багатоступеневої метаболічної активації специфічних ферментів. Ферментна система, яка в першу чергу відповідальна за метаболізм ПАВ, являє собою систему оксидаз змішаної функції. Метаболізм ПАВ в печінці добре вивчений [60-65] та проходить за епоксид-діольною схемою згідно мікосомальної системи окиснення, яку спрощено можна описати наступним чином. На першій стадії монооксигенази каталізуються групою ферментів – цитохромами P450, які окиснюють один із зв'язків в молекулі ПАВ з утворенням епоксиду. На другій стадії епоксиди або ізомеризуються у феноли, або гідролізуються ферментом епоксидгідролазою до відповідного дигідродіола. На третій стадії дигідродіоли та феноли поєднуються за допомогою трансфераз з полярними молекулами. Отримані утворення краще розчиняються у воді, ніж вихідна молекула ПАВ, і через нирки виводяться організмом з сечею.

Однак і на цьому шляху детоксикації інколи виникають проблеми. Це пов'язано з тим, що деякі ПАВ – бенз(а)пірен, дибензантрацен, хризен (тобто відомі вуглеводні із 16 пріоритетних ПАВ) – мають в своїй структурі кутовий фрагмент бензольного кільця та западину (так званій «Bay-region»). Окиснення кутового бензольного кільця біля цієї западини відбувається не в один, а в два етапи з утворенням дуже реакційно активних речовин – епоксид-діолів, які до того ж проявляють надзвичайно високі канцерогенні, окиснювальні та токсичні властивості. Вони є електрофільними речовинами і легко взаємодіють з нуклеофільними групами азотовмісних структур ДНК, що призводить до утворення аддуктів. Такі властивості особливо характерні для гуаніну через наявність в його молекулі великої кількості нуклеофільних груп. Утворені ДНК-аддукти надзвичайно стійкі. Через утворення таких алкільних похідних ДНК виникають проблеми в процесах реплікації і транскрипції, які провокують мутації. Накопичення таких мутацій призводить до виникнення негативних впливів: придушення антіонкогенів (наприклад P53) і, як наслідок, повне пригнічення запрограмованої клітинної смерті – апоптоза, збільшення експресії трансформованих білків та початку малігнізації (виникнення злоякісної пухлини).

ПАВ можуть виявляти не тільки канцерогенні, а й генотоксичні властивості, тобто вони та продукти їх розпаду можуть безпосередньо взаємодіяти з генами, що призводить до пошкодження або руйнування ДНК [66]. Оцінювання генотоксичної та канцерогенної дії для деяких пріоритетних ПАВ наведені в таблиці 2 [67].

Але токсичність ПАВ та її вплив на різні клітини живих організмів залежить від їх метаболізму і фотоокиснення. Вони, як правило, більш токсичні в присутності ультрафіолетового випромінювання.

Розуміння динаміки метаболізму одиночного ПАВ та можливих відмінностей метаболізму в сумішах різних ПАВ характеризує небезпеку цих речовин.

Проводилися дослідження [68, 69] з порівняння метаболізму ПАВ для фенантрена, флуорантена і бенз(а)пірену в одинарній, бінарній і потрійній сумішах шляхом моніторингу зникнення вихідної сполуки. Було виявлено, що метаболізм одиночного ПАВ відрізняється від його метаболізму у складі бінарних і потрійних сумішей. Концентрація ферментів також впливає на перебіг хімічних реакцій в сумішах ПАВ, значно змінюючи процес обміну речовин в організмі для деяких ПАВ. Крім того, спостерігалось, що структура ПАВ теж впливає на метаболізм в сумішах, під час нього можливе проявлення токсичної дії. Швидкість зміни концентрації ПАВ з часом була більшою при метаболізмі одиночного ПАВ у порівнянні з його метаболізмом у складі бінарної або потрійної суміші.

## Генотоксичні та канцерогенні властивості деяких поліароматичних вуглеводнів

Назва речовини згідно класифікації CAS	Генотоксичність (SCF*, 2002 р.)	Канцерогенність (IPCS**, 1998 р.)
Нафталін	Дані неоднозначні	Дані неоднозначні
Аценафтен	Дані неоднозначні	Сумнівна
Аценафталін	Дані неоднозначні	Не вивчалася
Флуорен	Дані неоднозначні	Відсутня
Фенантрен	Позитивна	Сумнівна
Антрацен	Відсутня	Позитивна
Флуорантен	Позитивна	Позитивна
Пірен	Відсутня	Сумнівна
Хризен	Позитивна	Позитивна
Бенз(а)антрацен	Позитивна	Позитивна
Бенз(б) флуорантен	Позитивна	Позитивна
Бенз(а)пірен	Позитивна	Позитивна
Дібенз(а,һ)антрацен	Позитивна	Позитивна
Бенз(к)флуорантен	Позитивна	Позитивна
Індено(1,2,3-с,д)пірена	Позитивна	Позитивна
Бенз(ɡ,һ,і)перілен	Позитивна	Сумнівна
Антантрен	Дані обмежені	Позитивна
Коронен	Дані обмежені	Сумнівна

Примітка: \* – Scientific Committee on Food, 1974-2002 p.p.

\*\* – International Programme on Chemical Safety.

Враховуючи надзвичайну канцерогенну та мутагенну активність багатьох ПАВ і постійне накопичення їх у навколишньому середовищі, доцільним є проведення поглиблених наукових досліджень щодо отримання більшого об'єму конкретних екотоксикологічних даних та їх узагальнення відносно ПАВ та їх метаболітів. Також доцільним є зниження їх вмісту або повна нейтралізація скрізь, де це можливо [70, 71].

#### ЛІТЕРАТУРА

1. *Клар Э.* Полициклические ароматические углеводороды. М.: Химия. 1971. 256 с.
2. *Sander L.C. and Wise S.A.* NIST Special Publication 922, Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Structure Index.
3. World Health Organization. IPCS, Environmental Health Criteria 202, Selected Non-heterocyclic Aromatic Hydrocarbons. 1998.
4. ISPAC 2003 International Society for Polycyclic Aromatic Compounds 2003. PAH structure/properties. URL: <http://www.ispac.org/Links.htm>
5. *Аткінсон Р., Ару J.* Атмосферна хімія газофазних поліциклічних ароматичних вуглеводнів – утворення атмосферних мутагенів. *Environ Health Persp.*, 1994. V. 102. P. 117-126. DOI: <https://doi.org/10.2307/3431940>
6. *Peter E.T.* Douben (Ed.), PAHs: An Ecotoxicological Perspective. ISBN: 978-0-471-56024-1. New York: John Wiley and Sons Ltd. 2003. P. 47-63, 404 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/0470867132>

7. **Fetzer J.C.** The Chemistry and Analysis of the Large Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. Polycyclic Aromatic Compounds. New York: Wiley, 2000. V. 27 (2). P. 143-162. DOI: <https://doi.org/10.1080/10406630701268255>
8. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons - Occurrence in foods, dietary exposure and health effects. European Commission, Scientific Committee on Food. 2002, December 4. URL: [http://ec.europa.eu/food/fs/sc/scf\\_out153\\_en](http://ec.europa.eu/food/fs/sc/scf_out153_en).
9. **Дикун П.П.** Вредные вещества в промышленности. Л.: Химия, 1973. Т. 1, 320 с.
10. **Рабинович В.А., Хавин З.Я.** Краткий химический справочник. Л.: Химия, 1977, 432 с.
11. Свойства органических соединений: Справочник. Под ред. Потехина А.А. Л.: Химия, 1984, 520 с.
12. Справочник по растворимости. Т. 1, Кн. 2. М.-Л.: ИАН СССР, 1962, 502 с.
13. Химическая энциклопедия. Ред. И.Л. Кнунянц. Советская энциклопедия. М., 1988. Т. 1, 623 с.
14. **Дмитриков В., Ларионов О., Набивач В.** Анализ ПАУ методом ВЭЖХ. *Успехи химии*, 1987. Т. 56(4). С. 679-700.
15. **Шабод Л.М.** О циркуляции канцерогенов в окружающей среде. М., 1973, 300 с.
16. **Казицина Л.А., Куплетская Н.Б.** Применение УФ-, ИК-, ЯМР- и масс-спектрологии в органической химии. М., Изд-во МГУ, 1979, 240 с.
17. **Теплицкая Т.А.** Квазилинейные спектры люминесценции как метод исследования сложных природных органических смесей. М.: Изд-во МГУ, 1971, 78 с.
18. **Mackay D., Shiu W.Y., Ma K.-C., Lee S.C.** Handbook of Physical-Chemical Properties and Environmental Fate for Organic Chemicals. CRC Press, 2006. Vol. 1.
19. **Свердлова О.В.** Электронные спектры в органической химии. Л.: Химия, 1985, 248 с.
20. **Алексеева Т.А., Теплицкая Т.А.** Разработка принципов определения типа молекулярной структуры неизвестных соединений сложных смесей методами люминесцентной спектроскопии. *Изв. АН СССР, серия физич.*, 1978. Т. 42. N 3. С. 669-674.
21. **Алексеева Т.А., Теплицкая Т.А.** Спектрофлуориметрические методы анализа ароматических углеводородов в природных и техногенных средах. Л.: Гидрометеоздат, 1981, 215 с.
22. **А.П. Ильницкий, Г.А. Белицкий, В.С. Мищенко, Н.В. Вижникова, Р.Г. Бутенко.** О возможной эволюционной роли бенз(а)пирена и других канцерогенных углеводородов. *Доклады АН СССР*, 1984. Т. 274. N 1. С. 216-219.
23. **Флоровская В.Н.** Предбиологическая эволюция углеродистых веществ на ранней Земле: Геологический аспект. М.: Книжный дом «Либроком», 2012, 224 с.
24. **Battersby S.** Space molecules point to organic origins. *New Scientist*, 2004. Retrieved 2009-12-11. URL: <http://www.newscientist.com/article/dn4552-space-molecules-point-to-organic-origins>
25. **Mulas G., Mallocci G., Joblin C., Toubanc D.** Estimated IR and phosphorescence emission fluxes for specific polycyclic aromatic hydrocarbons in the Red Rectangle. *Astronomy and Astrophysics*, 2006. P. 446-537. DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20053738>
26. **Garcia-Hernandez D.A., Manchado, A., Garcia-Lario P., Stanghellini L., Villaver E., Shaw R.A., Szczerba R., Perea-Calderon J.V.** Formation Of Fullerenes In H-Containing Planetary

Nebulae. *The Astrophysical Journal Letters*, 2010-10-28, 724 p. DOI: <https://doi.org/10.1088/2041-8205/724/1/L39>

27. **Atkinson Nancy**. Buckyballs Could Be Plentiful in the Universe. *Universe Today*. 2010-10-27. Retrieved 2010-10-28. URL <http://www.universetoday.com/76732/buckyballs-could-be-plentiful-in-the-universe>

28. **Ровинский Ф.Я., Теплицкая Т.А., Алексеева Т.А.** Фоновый мониторинг полициклических ароматических углеводов. Л.: Гидрометеиздат, 1988, 224 с.

29. **Tolosa I., Bayona J.M., Albaiges J.** Aliphatic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Sulfur. Oxygen Derivatives in Northwestern Mediterranean Sediments: Spatial and Temporal Variability, Fluxes, and Budgets *Environ Sci Technol*, 1996. V.30. P. 2495-2503. DOI: <https://doi.org/10.1021/es950647x>

30. World Health Organization. Polynuclear aromatic hydrocarbons in drinking water. Background Document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. 2003. [WHO/SDE/WSH/03.04/59]. URL: [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/chemicals/en/index.html](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/en/index.html)

31. **Masih A., Taneja A.** Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) concentrations and related carcinogenic potencies in soil at a semi-arid region of India. *Chemosphere*, October 2006. V. 65(3). P. 449-456. . DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.01.062>

32. **Seo J.S, Keum Y.S, Harada R.M, Li Q.X.** Isolation and characterization of bacteria capable of degrading polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and organophosphorus pesticides from PAH-contaminated soil in Hilo, Hawaii. *Agric Food Chem.*, 11 Jul 2007, 55(4). P. 5383-5389. PMID:17552538. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf0637630>

33. **Ильницкий А.П.** Канцерогенные углеводороды в почве, воде и растительности. Канцерогены в окружающей среде. М.: Гидрометеиздат, 1975. С. 53-71.

34. **Ильницкий А.П., Белицкий Г.А., Шабад Л.М.** О канцерогенном ароматическом углеводороде бенз(а)пирене в выбросах вулканов. *Доклады АН СССР*, 1975. Т. 225. N 1. С. 214-216.

35. **Ильницкий А.П., Мищенко В.С. Шабад Л.М.** Природные источники канцерогенных углеводородов. Канцерогенные вещества в окружающей среде. М.: Гидрометеиздат, 1979. С. 25-29.

36. **Дикун П.П.** Определение полициклических ароматических углеводов. Проблемы аналитической химии. М.: Наука, 1979. N 6. С. 100-116.

37. **Геннадиев А.Н., Козин И.С., Шурубор Е.И. и др.** Динамика загрязнения почв полициклическими ароматическими углеводородами и индикация состояния почвенных экосистем. *Почвоведение*, 1990. N 1. С. 75-85.

38. **П.П. Дикун, И.А. Калинина.** Методические указания по качественному и количественному определению канцерогенных полициклических ароматических углеводов в продуктах сложного состава. М., 1976, 44 с.

39. **Шурубор Е.И.** Полициклические ароматические углеводороды в системе почва-растение района нефтепереработки (Пермское Прикамье). *Почвоведение*, 2000. N 12. С. 1509-1514.

40. **Pampanin D.M., Sydnies M.O.** Polycyclic Aromatic Hydrocarbons a Constituent of Petroleum: Presence and Influence in the Aquatic Environment. In *Hydrocarbon*, ed: V. Kutcherov. 2013. DOI: <https://doi.org/10.5772/48176>

**41. Хаустов А.П., Редина М.М.** Полициклические ароматические углеводороды как геохимические маркеры загрязнения окружающей среды. *Экспозиция. Нефть. Газ*. 2014. N 4(36). С. 92-97.

**42. Stogiannidis E., Laane R.** Source Characterization of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Using Their Molecular Indices: An Overview of Possibilities. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 2015. P. 49-133, 234 p. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-10638-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-10638-0_2)

**43. Geier M.C., Chlebowski A.C., Truong L., Massey Simonich S.L., Anderson K.A., Tanguay R.L.** Comparative developmental toxicity of a comprehensive suite of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Arch Toxicol.*, 2018 Feb, 92(2). P. 571-586. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00204-017-2068-9>

**44. Флоровская В.Н., Теплицкая Т.А., Мархинин Е.К., Подклетнов Н.Е.** Полиядерные арены в продуктах вулканических извержений. *Доклады АН СССР*, 1978. Т. 240. N 1. С. 221-222.

**45. Wang. Z., Yang C., Yang Z., Sun J., Hollebone B., Brown C., Landriault M.** Forensic fingerprinting and source identification of the 2009 Sarnia (Ontario) oil spill. *J Environ. Monit.*, Nov 2011. V. 13(11). P. 3004-3017. Epub 28 Sep 2011. DOI: <https://doi.org/10.1039/c1em10620a>

**46. Parker D.S.N., Zhang F., Seol Kim Y., Kaiser R.I., Landera A., Kislov V.V. et al.** Low Temperature Formation of Naphthalene and its Role in the Synthesis of PAH in the Interstellar Medium. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 2012. V. 109 (1). P. 53-58. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1113827108>

**47. Zhang Y., Tao S.** Global atmospheric emission inventory of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) for 2004. *Atmospheric Environment*, 2009 (43). P. 812-819. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.10.050>

**48. М.С. Ассад, В.В. Грушевский, О.Г. Пенязьков, И.Н. Тарасенко.** Выбросы полициклических ароматических углеводородов в продуктах сгорания автомобильных бензиновых двигателей. *Доклады Национальной академии наук Беларуси*, 2018. Т. 62. N 3. С. 341-346. DOI: <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-341-346>

**49. Шилина А.И.** Миграция бенз(а)пирена в окружающей среде. Комплексный глобальный мониторинг загрязнения окружающей природной среды. Труды 2-го Международного симпозиума. Л.: Гидрометеиздат, 1982. С. 238-242.

**50. Лач А.** Канцерогенный эффект полициклических ароматических углеводородов. Лондон: Империял Колледж Пресс, 2005. ISBN 1-86094-417-5.

**51. Ли С.Д., Грант Л.** Здоровье и экологическая оценка полициклических ароматических углеводородов. Иллинойс: Патотекс Парк Форест Союз, 1981, 364 с.

**52. Едвардс Н.Т.** Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) в наземной окружающей среде – обзор. *Качество окружающей среды*, 1983. N 12. С. 427-441.

**53.** Regulation (EC) No 166/2006 of the European Parliament and of the Council of 18 January 2006 concerning the establishment of a European Pollutant Release and Transfer Register and amending Council Directives 91/689/EEC and 96/61/EC. *Official Journal of the European Union*, 10-02-2016. URL: <http://data.europa.eu/eli/reg/2006/166/oj>

**54.** U.S. Environmental Protection Agency. Human Health Evaluation Manual, Supplemental Guidance: Standard Default Exposure Factors. Publication 9285.6-03. Washington DC, USA. Office of Emergency and Remedial Response, 1991. URL: <http://www.epa.gov>

55. U.S. Environmental Protection Agency. Provisional Guidance for Quantitative Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. Washington DC, USA. Office of Research and Development, 1993. URL: <http://www.epa.gov>
56. Opinion of the Scientific Committee on Food on the risks to human health of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in food. EC, SCF/CS/CNTM/PAH/29. 2002. URL: [http://europe.eu.int/comm/food/fs/sc/scf/index\\_en.html](http://europe.eu.int/comm/food/fs/sc/scf/index_en.html)
57. Findings of the EFSA Data Collection on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Food. EFSA/DATEX/002 (revision 1), 2008. URL: <http://www.efsa.europa.eu>
58. **Chen B.H., Lin Y.S.** Formation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons during processing of duck meat. *J. Agric. Food Chem.*, 1997. V. 45. P. 1394-1403. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf9606363>
59. Качество воды с точки зрения содержания полициклических ароматических углеводородов. Служба рыбы и дикой природы США, Центр исследования живой природы Агентство по защите окружающей среды США. Патуксент. Лаурель. ЕПА. 1980. 440/5-80-069.193. URL: <http://www.epa.gov>
60. **J. Beyer, G. Jonsson, C. Porte, M.M. Krahn, F. Ariese.** Analytical methods for determining metabolites of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) pollutants in fish bile: A review. *Environ Toxicol Pharmacol*, 2010. V. 30. P. 224-244. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.etap.2010.08.004>
61. **Sandeep Agrawal, Amar Preet Kaur, Kanchan Taneja.** A Comprehensive Review of Benzo Alpha Pyrene (B[A]P). Toxicology. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, ISSN: 0975-8585, 2018. V. 9(4) P. 1049-1058.
62. **F. Oesch, P. Bentley, M. Golan, P. Stasiecki.** Metabolism of Benzo(a)pyrene by Subcellular Fractions of Rat Liver: Evidence for Similar Patterns of Cytochrome P-450 in Rough and Smooth Endoplasmic Reticulum but not in Nuclei and Plasma Membrane. *Cancer research*, 1985, 45(10), P. 4838-4843.
63. **А.И. Сотниченко, В.А. Суханов, А.Н. Саприн.** Микросомальный метаболизм 3,4-бензпирена. I. Ускоренное хроматографическое разделение и идентификация метаболитов «в потоке». *Хим.-фарм.журнал*, 1985. N 12. С. 1435-1440.
64. **А.И. Сотниченко, В.А. Суханов, А.Н. Саприн.** Микросомальный метаболизм 3,4-бензпирена. II. Количественное определение 7,8-диокси-7,8-дигидробензпирена. *Хим.-фарм. журнал*, 1986. N 1. С. 28-32.
65. **А.И. Сотниченко, А.Н. Саприн.** Микросомальный метаболизм 3,4-бензпирена. III. Ограниченный характер субстратно-позиционной специфичности аренэпоксидазы и её зависимость от свойств окисляемой связи. *Хим.фарм. журнал*, 1986. N 12. С. 1429-1437.
66. **L. Campo, F. Rossella, S. Pavanello, D. Mielzynska, E. Siwinska, L. Kapka, P.A. Bertz, S. Fustinon.** Urinary profiles to assess polycyclic aromatic hydrocarbons exposure in coke-oven workers. *Toxicology Letters*, 2010, 192(1). P. 72-78. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2008.12.018>
67. International Programme on Chemical Safety. Selected Non-heterocyclic Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. In: Environmental Health Criteria, Series 202. World Health Organization, Geneva, Switzerland, 1998. URL: <http://www.who.int/iris/handle/10665/41958>
68. **M. Benedetti, G. Martuccio, D. Fattorini, A. Canapa, M. Barucca, M. Nigro, F. Regoli.** Oxidative and modulatory effects of trace metals on metabolism of polycyclic aromatic

hydrocarbons in the Antarctic fish. *Trematomus bernacchii*. *Aqua Toxicol.*, 2007, 85. P. 167-175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2007.08.009>

69. **A. Tarantini, A. Maître, E. Lefèbvre, M. Marques, A. Rajhi, T. Douki.** Polycyclic aromatic hydrocarbons in binary mixtures modulate the efficiency of benzo[a]pyrene to form DNA adducts in human cells. *Toxicology*, 2011, 279 (1-3). P. 36-44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tox.2010.09.002>

70. **Нгандже Тересе Нтонзи, Абара Энагу Абара, Ибе Кеннет А, Неджи Питер Амба.** Экологическое и токсикологическое воздействие полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) на окружающую среду. *Журн. науч. публ. аспирантов и докторантов*. 2009. N 8 (38). С. 98-102. URL: <http://www.jurnal.org/articles/2009/ekol2.html>

71. **Суздорф А.Р., Морозов С.В., Кузубова Л.И. и др.** Полициклические ароматические углеводороды в окружающей среде - источники, профили и маршруты превращений. *Химия в интересах устойчивого развития*, 1994. Т. 2. N 2-3. С. 511-540.

## REFERENCES

1. **Klar E.** Politsiklicheskiye aromatcheskiye uglevodorody. M.: Khimiya, 1971, 256 s. [in Russ.]
2. **Sander L.C. and Wise S.A.** NIST Special Publication 922, Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Structure Index.
3. World Health Organization. IPCS, Environmental Health Criteria 202, Selected Non-heterocyclic Aromatic Hydrocarbons. 1998.
4. ISPAC 2003 International Society for Polycyclic Aromatic Compounds 2003. PAH structure/properties. URL: <http://www.ispac.org/Links.htm>
5. **Atkinson R., Ary J.** Atmosferna khimiya hazofaznykh politsyklichnykh aromatchnykh vuhlevodniv – utvorenniya atmosfernykh mutaheniv. *Environ Health Persp.*, 1994. V. 102. P. 117-126. [in Ukr.] DOI: <https://doi.org/10.2307/3431940>
6. **Peter E.T.** Douben (Ed.), PAHs: An Ecotoxicological Perspective. ISBN: 978-0-471-56024-1. New York.: John Wiley and Sons Ltd. 2003. P. 47-63, 404 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/0470867132>
7. **Fetzer J.C.** The Chemistry and Analysis of the Large Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. Polycyclic Aromatic Compounds. New York: Wiley. 2000. V. 27 (2). P. 143-162. DOI: <https://doi.org/10.1080/10406630701268255>
8. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons – Occurrence in foods, dietary exposure and health effects. European Commission, Scientific Committee on Food. 2002, December 4. URL: [http://ec.europa.eu/food/fs/sc/scf out153\\_en](http://ec.europa.eu/food/fs/sc/scf out153_en).
9. **Dikun P.P.** Vrednyye veshchestva v promyshlennosti. L.: Khimiya, 1973. T. 1, 320 s. [in Russ.]
10. **Rabinovich V.A., Khavin Z.YA.** Kratkiy khimicheskiy spravochnik. L.: Khimiya, 1977, 432 s. [in Russ.]
11. Svoystva organicheskikh soyedineniy: Spravochnik. Pod red. Potekhina A.A. L.: Khimiya. 1984, 520 s. [in Russ.]
12. Spravochnik po rastvorimosti. T. 1, Kn. 2. M.-L.: IAN SSSR, 1962, 502 s. [in Russ.]
13. Khimicheskaya entsiklopediya. Red. I.L. Knunyants. Sovetskaya entsiklopediya. M., 1988. T. 1, 623 s. [in Russ.]
14. **Dmitrikov V., Larionov O., Nabivach V.** Analiz PAU metodom VEZHKKH. *Uspekhi khimii*, 1987. T. 56(4). S. 679-700. [in Russ.]



15. **Shabad L.M.** O tsirkulyatsii kantserogenov v okruzhayushchey crede. M. 1973, 300 s. [in Russ.]
16. **Kazitsyna L.A., Kupletskaya N.B.** Primeneniye UF-, IK-, YAMR- i mass-spektroskopii v organicheskoy khimii. M., Izd-vo MGU, 1979, 240 s. [in Russ.]
17. **Teplitskaya T.A.** Kvazilineynnye spektry lyuminestsentsii kak metod issledovaniya slozhnykh prirodnykh organicheskikh smesey. M.: Izd-vo MGU, 1971, 78 s. [in Russ.]
18. **Mackay D., Shiu W.Y., Ma K.-C., Lee S.C.** Handbook of Physical-Chemical Properties and Enviromental Fate for Organic Chemacals. CRC Press, 2006. Vol. 1.
19. **Sverdlova O.V.** Elektronnyye spektry v organicheskoy khimii. L.:Khimiya, 1985, 248 s. [in Russ.]
20. **Alekseyeva T.A., Teplitskaya T.A.** Razrabotka printsipov opredeleniya tipa molekulyarnoy struktury neizvestnykh soyedineniy slozhnykh smesey metodami lyuminestsentnoy spektroskopii. *Izv. AN SSSR, seriya fizich.*, 1978. T. 42. N 3. S. 669-674. [in Russ.]
21. **Alekseyeva T.A., Teplitskaya T.A.** Spektrofluorimetricheskiye metody analiza aromaticeskikh uglevodorodov v prirodnykh i tekhnogennykh sredakh. L.: Gidrometeoizdat, 1981, 215 s. [in Russ.]
22. **A.P. Il'nitskiy, G.A. Belitskiy, V.S. Mishchenko, N.V. Vizhnikova, R.G. Butenko.** O vozmozhnoy evolyutsionnoy roli benz(a)pirena i drugikh kantserogennykh uglevodorodov. *DAN SSSR*, 1984. T. 274. N 1. S. 216-219. [in Russ.]
23. **Florovskaya V.N.** Predbiologicheskaya evolyutsiya uglerodistykh veshchestv na ranney Zemle: Geologicheskiy aspekt. M.: Knizhnyy dom «Librokom», 2012, 224 s. [in Russ.]
24. **Battersby S.** Space molecules point to organic origins. *New Scientist*, 2004. Retrieved 2009-12-11. URL: <http://www.newscientist.com/article/dn4552-space-molecules-point-to-organic-origins>
25. **Mulas G., Malloci G., Joblin C., Toubanc D.** Estimated IR and phosphorescence emission fluxes for specific polycyclic aromatic hydrocarbons in the Red Rectangle. *Astronomy and Astrophysics*, 2006. P. 446- 537. DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20053738>
26. **Garcia-Hernandez D.A., Manchado A., Garcia-Lario P., Stanghellini L., Villaver E., Shaw R.A., Szczerba R., Perea-Calderon J.V.** Formation Of Fullerenes In H-Containing Planetary Nebulae. *The Astrophysical Journal Letters*, 2010-10-28, 724 p. DOI: <https://doi.org/10.1088/2041-8205/724/1/L39>
27. **Atkinson Nancy.** Buckyballs Could Be Plentiful in the Universe. *Universe Today*, 2010-10-27. Retrieved 2010-10-28. URL: <http://www.universetoday.com/76732/buckyballs-could-be-plentiful-in-the-universe>
28. **Rovinskiy F.YA., Teplitskaya T.A., Alekseyeva T.A.** Fonovyy monitoring politsiklicheskikh aromaticeskikh uglevodorodov. L.: Gidrometeoizdat, 1988, 224 s. [in Russ.]
29. **Tolosa I., Bayona J.M., Albaiges J.** Aliphatic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Sulfur. Oxygen Derivatives in Northwestern Mediterranean Sediments: Spatial and Temporal Variability, Fluxes, and Budgets *Environ Sci Technol*, 1996. V. 30. P. 2495-2503. DOI: <https://doi.org/10.1021/es950647x>
30. World Health Organization. Polynuclear aromatic hydrocarbons indrinking water. Background Document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality, 2003, [WHO/SDE/WSH/03.04/59]. URL: [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/chemicals/en/index.html](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/en/index.html)

31. **Masih A., Taneja A.** Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) concentrations and related carcinogenic potencies in soil at a semi-arid region of India. *Chemosphere*, October 2006. V. 65(3). P. 449-456. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.01.062>

32. **Seo J.S., Keum Y.S., Harada R.M., Li Q.X.** Isolation and characterization of bacteria capable of degrading polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and organophosphorus pesticides from PAH-contaminated soil in Hilo, Hawaii. *Agric Food Chem.*, 11 Jul 2007, 55(4). P. 5383-5389. PMID:17552538. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf0637630>

33. **Il'nitskiy A.P.** Kantserogennyye uglevodorody v pochve, vode i rastitel'nosti. Kantserogeny v okruzhayushchey srede. M.: Gidrometeoizdat, 1975, S. 53-71. [in Russ.]

34. **Il'nitskiy A.P., Belitskiy G.A., Shabad L.M.** O kantserogennom aromatischeskom uglevodorode benz(a)pirene v vybrosakh vulkanov. *Doklady AN SSSR*, 1975. T. 225. N 1. S. 214-216. [in Russ.]

35. **Il'nitskiy A.P., Mishchenko V.S., Shabad L.M.** Prirodnyye istochniki kantserogennykh uglevodorodov. Kantserogennyye veshchestva v okruzhayushchey srede. M.: Gidrometeoizdat, 1979. S. 25-29. [in Russ.]

36. **Dikun P.P.** Opreddeniye politsiklicheskikh aromatischeskikh uglevodorodov. Problemy analiticheskoy khimii. M.: Nauka, 1979. N 6. S. 100-116. [in Russ.]

37. **Gennadiyev A.N., Kozin I.S., Shurubor Ye.I. i dr.** Dinamika zagryazneniya pochv politsiklicheskimi aromatischeskimi uglevodorodami i indikatsiya sostoyaniya pochvennykh yekosistem. *Pochvovedeniye*, 1990. N 1. S. 75-85. [in Russ.]

38. **P.P. Dikun, I.A. Kalinina.** Metodicheskiye ukazaniya po kachestvennomu i kolichestvennomu opredeleniyu kantserogennykh politsiklicheskikh aromatischeskikh uglevodorodov v produktakh slozhnogo sostava. M., 1976, 44 s. [in Russ.]

39. **Shurubor Ye.I.** Politsiklicheskiye aromatischeskiye uglevodorody v sisteme pochva-rasteniye rayona neftepererabotki (Permskoye Prikam'ye). *Pochvovedeniye*, 2000. N 12. S. 1509-1514. [in Russ.]

40. **Pampanin D.M., Sydnes M.O.** Polycyclic Aromatic Hydrocarbons a Constituent of Petroleum: Presence and Influence in the Aquatic Environment. In *Hydrocarbon*, ed: V. Kutcherov. 2013. DOI: <https://doi.org/10.5772/48176>

41. **Khaustov A.P., Redina M.M.** Politsiklicheskiye aromatischeskiye uglevodorody kak geokhimicheskiye markery zagryazneniya okruzhayushchey sredy. *Ekspozitsiya. Neft. Gaz.* 2014. N 4(36). S. 92-97. [in Russ.]

42. **Stogiannidis E., Laane R.** Source Characterization of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Using Their Molecular Indices: An Overview of Possibilities. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 2015. P. 49-133, 234 p. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-10638-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-10638-0_2)

43. **Geier M.C., Chlebowski A.C., Truong L., Massey Simonich S.L., Anderson K.A., Tanguay R.L.** Comparative developmental toxicity of a comprehensive suite of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Arch Toxicol.*, 2018 Feb. 92(2). P. 571-586. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00204-017-2068-9>

44. **Florovskaya V.N., Teplitskaya T.A., Markhinin Ye.K., Podkletnov N.Ye.** Poliyadernyye areny v produktakh vulkanicheskikh izverzheniy. *Doklady AN SSSR*, 1978. T. 240. N 1. S. 221-222. [in Russ.]

45. **Wang Z., Yang C., Yang Z., Sun J., Hollebhone B., Brown C., Landriault M.** Forensic fingerprinting and source identification of the 2009 Sarnia (Ontario) oil spill. *J Environ.*

*Monit.*, Nov 2011. V. 13(11). P. 3004-3017. Epub 28 Sep 2011. DOI: <https://doi.org/10.1039/c1em10620a>

**46. Parker D.S.N., Zhang F., Seol Kim Y., Kaiser R.I., Landera A., Kislov V.V. et al.** Low Temperature Formation of Naphthalene and its Role in the Synthesis of PAH in the Interstellar Medium. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 2012. V. 109 (1). P. 53-58. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1113827108>

**47. Zhang Y., Tao S.** Global atmospheric emission inventory of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) for 2004. *Atmospheric Environment*, 2009. (43). P. 812-819. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.10.050>

**48. M. Assad, V.V. Grushevski, O.G. Penyazkov, I.N. Tarasenko.** Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons contained in combustion products of gasoline engines. Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus, 2018. T. 62. N 3. S. 341-346. DOI: <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-341-346>

**49. Shilina A.I.** Migratsiya benz(a)pirena v okruzhayushchey srede. Kompleksnyy global'nyy monitoring zagryazneniya okruzhayushchey prirodnoy sredy. Trudy 2-go Mezhdunarodnogo simpoziuma. L.: Gidrometeoizdat, 1982. S. 238-242. [in Russ.]

**50. Lach A.** Kantserogennyy effekt politsiklicheskikh aromatcheskikh uglevodorodov. London: Imperial Kolledzh Press, 2005. ISBN 1-86094-417-5. [in Russ.]

**51. Li S.D., Grant L.** Zdorov'ye i ekologicheskaya otsenka politsiklicheskikh aromatcheskikh uglevodorodov. Illinoys: Patoteks Park Forest Souz, 1981, 364 s. [in Russ.]

**52. Yedwards N.T.** Politsiklicheskiye aromatcheskiye uglevodorody (PAU) v nazemnoy okruzhayushchey srede -obzor. *Kachestvo okruzhayushchey sredy*, 1983, (12). S. 427-441. [in Russ.]

**53.** Regulation (EC) No 166/2006 of the european parliament and of the council of 18 January 2006 concerning the establishment of a European Pollutant Release and Transfer Register and amending Council Directives 91/689/EEC and 96/61/EC. *Official Journal of the European Union*, 10-02-2016, URL: <http://data.europa.eu/eli/reg/2006/166/oj>

**54.** U.S. EPA. Human Health Evaluation Manual, Supplemental Guidance: Standard Default Exposure Factors. Publication 9285.6-03. Washington. Office of Emergency and Remedial Response, 1991. URL: <http://www.epa.gov>

**55.** U.S. Environmental Protection Agency. Provisional Guidance for Quantitative Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. Washington DC. Office of Research and Development, 1993. URL: <http://www.epa.gov>

**56.** Opinion of the Scientific Committee on Food on the risks to human health of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in food. EC, SCF/CS/CNTM/PAH/29. 2002. URL: [http://europe.eu.int/comm/food/fs/sc/scf/index\\_en.html](http://europe.eu.int/comm/food/fs/sc/scf/index_en.html)

**57.** Findings of the EFSA Data Collection on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Food. EFSA/DATEX/002 (revision 1), 2008. URL: <http://www.efsa.europa.eu>

**58. Chen B.H., Lin Y.S.** Formation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons during processing of duck meat. *J. Agric. Food Chem.*, 1997. V. 45. P. 1394-1403. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf9606363>

**59.** Ambient Water Quality Criteria for Polynuclear Aromatic Hydrocarbons. USA Environmental Protection Agency. EPA 440/5-80-069.193. Oct. 1980. URL: <http://www.epa.gov>

**60. J. Beyer, G. Jonsson, C. Porte, M.M. Krahn, F. Ariese.** Analytical methods for determining metabolites of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) pollutants in fish bile: A

review. *Environ Toxicol Pharmacol*, 2010. V. 30. P. 224-244. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.etap.2010.08.004>

**61. Sandeep Agrawal, Amar Preet Kaur, Kanchan Taneja.** A Comprehensive Review of Benzo Alpha Pyrene (B[A]P). Toxicology. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, ISSN: 0975-8585, 2018. V. 9(4). P. 1049-1058.

**62. F. Oesch, P. Bentley, M. Golan, P. Stasiecki.** Metabolism of Benzo(a)pyrene by Subcellular Fractions of Rat Liver: Evidence for Similar Patterns of Cytochrome P-450 in Rough and Smooth Endoplasmic Reticulum but not in Nuclei and Plasma Membrane. *Cancer research*, 1985, 45(10). P. 4838-4843.

**63. A.I. Sotnichenko, V.A. Sukhanov, A.N. Saprin.** Mikrosomal'nyy metabolizm 3,4-benzpirena. I. Uskorennoye khromatograficheskoye razdeleniye i identifikatsiya metabolitov «v potoke». *Khim.-farm.zhurnal*, 1985. N 12. S. 1435-1440. [in Russ.]

**64. A.I. Sotnichenko, V.A. Sukhanov, A.N. Saprin.** Mikrosomal'nyy metabolizm 3,4-benzpirena. II. Kolichestvennoye opredeleniye 7,8-dioksi-7,8-digidrobenzpirena. *Khim.-farm. zhurnal*, 1986. N 1. S. 28-32. [in Russ.]

**65. A.I. Sotnichenko, A.N. Saprin.** Mikrosomal'nyy metabolizm 3,4-benzpirena. III. Ogranichennyy kharakter substratno-pozitsionnoy spetsifichnosti arenepoksidazy i yeyo zavisimost' ot svoystv okislyayemoy svyati. *Khim.farm. zhurnal*, 1986. N 12. S. 1429-1437. [in Russ.]

**66. L. Campo, F. Rossella, S. Pavanello, D. Mielzynska, E. Siwinska, L.Kapka, P.A. Bertaz, S. Fustinon.** Urinary profiles to assess polycyclic aromatic hydrocarbons exposure in coke-oven workers, *Toxicology Letters*, 2010, 192(1). P. 72-78. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2008.12.018>

**67.** International Programme on Chemical Safety. Selected Non-heterocyclic Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. In Environmental Health Criteria, Series 202. World Health Organization, Geneva, Switzerland, 1998. URL: <http://www.who.int/iris/handle/10665/41958>

**68. M. Benedetti, G. Martuccio, D. Fattorini, A. Canapa, M. Barucca, M. Nigro, F. Regoli.** Oxidative and modulatory effects of trace metals on metabolism of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Antarctic fish. *Trematomus bernacchii*. *Aqua Toxicol.*, 2007, 85. P. 167-175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2007.08.009>

**69. A. Tarantini, A. Maître, E. Lefèbvre, M. Marques, A. Rajhi, T. Douki.** Polycyclic aromatic hydrocarbons in binary mixtures modulate the efficiency of benzo[a]pyrene to form DNA adducts in human cells. *Toxicology*, 2011, 279 (1-3). P. 36-44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tox.2010.09.002>

**70. Ngandzhe Terese Ntonzi, Abara Enagu Abara, Ibe Kennet A, Nedzhi Piter Amba.** Ekologicheskoye i toksikologicheskoye vozdeystviye politsiklicheskikh aromaticheskikh uglevodorodov (PAU) na okruzhayushchuyu sredu. *Zhurn. nauch. publ. aspirantov i doktorantov*, 2009, 8 (38). S. 98-102. URL: <http://www.jurnal.org/articles/2009/ekol2.html>

**71. Suzdorf A.R., Morozov C.B., Kuzubova L.I. i dr.** Politsiklicheskiye aromaticheskiye uglevodorody v okruzhayushchey srede - istochniki, profili i marshruty prevrashcheniy. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 1994. T. 2. N 2-3. S. 511-540. [in Russ.]

*ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища» НАН України, м. Київ*

*Надійшло до редакції 10 жовтня 2018 р.*