

## ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ

УДК [543.54+543.51:547.993]504.064.3:574.64

МИЛЮКИН М.В., ГОРБАНЬ М.В.

### **МОНИТОРИНГ И ДИСПЕРСНО-ФАЗОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЛЕГКИХ ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИХ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ПРИРОДНОЙ ВОДЕ**

*Определены концентрации 10 легких полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в образцах природной воды р. Днепр, отобранных в районе Киева на протяжении 2011–2013 гг.; установлено их дисперсно-фазовое распределение. Общее содержание легких ПАУ (нафталин, аценафтилен, аценафтен, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, бенз(а)антрацен, хризен) находилось в пределах 5.5–287.4 нг/дм<sup>3</sup>. Превалировали нафталин, фенантрен и флуорантен, их максимальные концентрации составили, соответственно, 194.5, 142.5, 55.7 нг/дм<sup>3</sup>. Доли легких ПАУ на грубой, тонкой фракциях взвешенных частиц и их водорастворимая часть составили в среднем 19, 39 и 42 %, соответственно. Установлено, что дисперсно-фазовое распределение индивидуальных ПАУ зависит от числа ароматических колец в молекуле соединения: чем оно выше, тем ниже водорастворимая часть ПАУ. Только нафталин находится преимущественно в водорастворимом состоянии. 3,4-кольцевые ПАУ практически полностью связаны с взвешенными частицами.*

**Ключевые слова:** природная вода, р. Днепр, легкие ПАУ, ТФЭ, ВЭЖХ/ФД, мониторинг, дисперсно-фазовое распределение.

*Визначено концентрації 10 легких поліциклічних ароматичних вуглеводнів (ПАВ) у зразках природної води р. Дніпро, відібраних в районі Києва протягом 2011–2013 рр.; встановлено їхнє дисперсно-фазове розподілення. Загальний вміст легких ПАВ (нафталін, аценафтилен, аценафтен, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пірен, бенз(а)антрацен, хрізен) знаходився в межах 5.5–287.4 нг/дм<sup>3</sup>. Превалювали нафталін, фенантрен і флуорантен, їхні максимальні концентрації склали, відповідно, 194.5, 142.5, 55.7 нг/дм<sup>3</sup>. Частки легких ПАВ на грубій, тонкій фракціях суспендованих частинок та їхня водорозчинна частка склали в середньому 19, 39 і 42 % відповідно. Встановлено, що дисперсно-фазове розподілення індивідуальних ПАВ залежить від числа ароматичних кілець у молекулі сполуки: чим воно вище, тим нижче водорозчинна частка ПАВ. Лише нафталін знаходиться переважно у водорозчинному стані. 3,4-кільцеві ПАВ практично повністю зв'язані з суспендованими частинками.*

**Ключові слова:** природна вода, р. Дніпро, легкі ПАВ, ТФЕ, ВЕРХ/ФД, моніторинг, дисперсно-фазове розподілення.

*In the samples of natural water of Dnieper River, collected in Kiev region during the period between 2011 and 2013 years, concentrations of 10 light polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) were determined and disperse-phase distribution of them was established. The total content of light PAHs (naphthalene, acenaphthylene, acenaphthene, fluorine, phenanthrene, anthracene, fluoranthene, pyrene, benz(a)anthracene, chrysene) ranged between 5.5 and 287.4 ng/dm<sup>3</sup>. Naphthalene, phenanthrene, fluoranthene prevailed in natural water of Dnieper River, their maximal concentrations were, respectively, 194.5, 142.5, 55.7 ng/l. Shares of light PAHs at rough and thin fractions of suspended particulate matter and their water-soluble part were on average 19,*

39 and 42 % respectively. It was established, that disperse-phase distribution of individual PAHs depends on the number of aromatic rings in the molecule of the compound: the higher this number the lower water-soluble part of PAH. Only naphthalene exists predominantly in water-soluble state. PAHs with number of aromatic rings 3 or 4 are almost completely associated with suspended particles.

**Keywords:** natural water, Dnieper River, light PAHs, SPE, HPLC/FD, monitoring, disperse-phase distribution.

## Введение

В связи с интенсивным развитием промышленности и транспорта р. Днепр подвержена значительному антропогенному воздействию. Вследствие широкого распространения и высокой токсичности полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) могут представлять значительную угрозу для экосистемы р. Днепр. С химической точки зрения, ПАУ — органические вещества, состоящие из двух или более конденсированных ароматических колец. Основным источником поступления ПАУ в окружающую среду является неполное сгорание органических веществ. Существуют природные и антропогенные источники эмиссии ПАУ. Природные — это лесные пожары и вулканические процессы, к антропогенным относятся процессы горения угля, дров, газа, бытовых и промышленных отходов, выхлопные газы автомобилей, сигаретный дым, а также утечка нефтепродуктов. ПАУ обладают канцерогенным, мутагенным, тератогенным, гепатотоксическим эффектами и могут быть отнесены к разряду суперэкоотоксикантов [1]. Наиболее токсическими соединениями являются бенз(*a*)пирен и дибенз(*a,h*)антрацен. Агентство по охране окружающей среды США (US Environmental Protection Agency, US EPA) рекомендует контролировать в объектах окружающей среды 16 приоритетных ПАУ: нафталин, аценафтилен, аценафтен, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, бенз(*a*)антрацен, хризен, бенз(*b*)флуорантен, бенз(*k*)флуорантен, бенз(*a*)пирен, индено(*1,2,3-cd*)пирен, дибенз(*a,h*)антрацен, бенз(*g,h,i*)перилен [1–3].

Низкое содержание ПАУ в природных водах требует применения высокочувствительных и селективных методов анализа в сочетании с предварительным эффективным концентрированием. В настоящее время для выделения органических микропримесей, в том числе ПАУ, из природных вод широко используется твердофазная экстракция (ТФЭ) на пористых полимерных сорбентах (ППС), которая имеет ряд преимуществ по сравнению с другими способами концентрирования. Подробно методика проведения ТФЭ представлена в монографии [1], работы по ее усовершенствованию продолжаются. Так, в статье [4] подтверждена пригодность ряда сорбентов (XAD-2, XAD-4, XAD-7, XAD-16, XAD-1180, XAD-2000, XAD-2010, Polysorb-1, Poros C<sub>18</sub>) для концентрирования ПАУ из природных вод, содержащих повышенные концентрации гуминовых и фульвокислот (ГФК) и антропогенных ПАВ. Данный вывод актуален для природной воды р. Днепр, которая характеризуется повышенным содержанием ГФК [5].

Являясь низкорастворимыми соединениями, в водной среде ПАУ ассоциируются со взвесью с дальнейшим накоплением в донных отложениях. Однако под действием специфических гидродинамических условий они могут десорбироваться из донных отложений и вновь переходить в водорастворимое состояние. Таким образом, в природной воде ПАУ находятся в разных физических формах, между которыми существует динамическое равновесие. В современной литературе уделяется внимание изучению распределения между физическими формами ПАУ. Так, данные, характеризующие распределение ПАУ между водной фазой и взвешенными частицами, приведены для речных [6–13], морских [14, 15], озерных [16, 17] и сточных вод [18]. Результаты, полученные в работе [6], свидетельствуют о том, что в водной среде большая часть ПАУ находится в связанном состоянии с взвешенными частицами (56.2–72.8 %). При этом на доли тонкой (размер частиц > 0.7 и < 2.7 мкм) и грубой (> 2.7 мкм) фракций взвешенных частиц приходится, соответственно, 89.6–94.3 и 5.7–10.4 % от общей концентрации

суспендированных ПАУ. Эти результаты подчеркивают особо важное значение тонкой фракции взвешенных частиц при переносе ПАУ в водных системах. В статьях [7, 15] проанализировано дисперсно-фазовое распределение индивидуальных ПАУ в природной воде и показано, что нафталин пребывает, в основном, в водорастворимом состоянии, а 5,6-циклические ПАУ практически полностью связаны с взвешенными частицами. По литературным данным концентрации ПАУ во фракции взвешенных частиц намного выше, чем в донных отложениях [8, 9, 16].

Для природной воды р. Днепр приведена характеристика дисперсно-фазового распределения хлорорганических пестицидов (ХОП) и полихлорированных бифенилов (ПХБ), которые имеют близкие физико-химические свойства с ПАУ [19, 20]. Показано, что 62–76 % ХОП и 45–58 % ПХБ находятся в связанном состоянии с взвешенными частицами.

Следует отметить, что легкие ПАУ, в состав которых входит от 2 до 4 ароматических колец, по своим свойствам значительно отличаются от тяжелых ПАУ (5, 6 ароматических колец). Они обладают меньшей токсичностью, большей летучестью и лучшей растворимостью в воде. Основные физико-химические свойства легких ПАУ находятся в следующих пределах: растворимость в воде —  $1.6 \cdot 10^{-3}$ –31 мг/дм<sup>3</sup>, логарифм коэффициента распределения в системе октанол — вода — 3.26–5.97, константа Генри — 0.2–56.2 Па·м<sup>3</sup>/моль, давление насыщенного пара —  $3.85 \cdot 10^{-6}$ –110 Па [21–23]. Наименее гидрофобным ПАУ является нафталин. В объектах окружающей среды на долю легких соединений обычно приходится более половины от общей концентрации ПАУ. Так, в воде и донных отложениях Азовского моря преобладают такие легкие ПАУ, как нафталин, флуорантен, фенантрен, хризен [24]. Аналогичные результаты получены для донных отложений озера Байкал [25].

Основные цели данной работы: мониторинг 10 легких ПАУ (нафталин, аценафтилен, аценафтен, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, бенз(*a*)антрацен, хризен) в природной воде Днепра в районе Киева; установление дисперсно-фазового распределения этих соединений между водной фазой (истинно водорастворимое состояние), тонкой фракцией взвешенных частиц (размер частиц > 0.45 и < 16–24 мкм) и грубой фракцией взвешенных частиц (> 16–24 мкм).

### **Экспериментальная часть**

Пробы природной воды отбирали в р. Днепр (вдоль левого берега) возле Киева осенью 2011, весной 2012, осенью 2013 г. При этом точки мониторинга 1–4, 6 располагались вдоль побережья Дарницкого района, точка мониторинга 5 – выше по реке, напротив Вышгорода.

Определенный объем (5 дм<sup>3</sup>) природной воды пропускали последовательно через грубый (16–24 мкм), тонкий (0,45 мкм) фильтры и пористый полимерный сорбент ХАД-2 или обращенно-фазный сорбент С<sub>18</sub>. После проведения фильтрации грубый и тонкий фильтры высушивали до воздушно-сухого состояния. Грубые фильтры гомогенизировали и гомогенизаты помещали в аппарат Сокслета для экстракции органических соединений с грубого фильтра. Тонкие фильтры не гомогенизировали, после высушивания помещали в аппарат Сокслета для экстракции органических соединений с тонкого фильтра.

Экстракцию органических соединений, которые были сорбированы на грубых взвешенных частицах (грубый фильтр) и на тонких взвешенных частицах (тонкий фильтр), проводили смесью органических растворителей ацетон/гексан в соотношении 1:1 объемом 140 см<sup>3</sup> в аппарате Сокслета в течение 16 ч.

Элюирование органических соединений с сорбентов ХАД-2 или С<sub>18</sub> выполняли последовательно ацетоном и гексаном в соотношении 1:1 и объемом 140 см<sup>3</sup>. Объем элюата (экстракта) составлял 140 см<sup>3</sup>.

К ацетоно-гексановым растворам экстрагированных ПАУ добавляли 70 см<sup>3</sup> воды. После интенсивного встряхивания и последующего разделения водно-ацетоновый слой удаляли.

Осушенный свежeproкаленным  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  гексановый экстракт ПАУ упаривали до определенного объема и аликвотную часть конечного экстракта (1 мкл) вводили в инжектор жидкостного хроматографа.

Идентификацию и определение ПАУ в полученных концентратах проводили методом высокоэффективной жидкостной хроматографии при флуоресцентном детектировании (ВЭЖХ/ФД). Концентраты ПАУ анализировали на приборе Waters Alliance W 2690 Separation Module с флуоресцентным детектором W 2475 при следующих параметрах: колонка Merck 150433 размером (250×4,6) мм с сорбентом LiChrosorb RP-18 (5 мкм), инжектируемый (автоинжектор) объем пробы 100 мкл, подвижная фаза – А ( $\text{CH}_3\text{CN}/\text{H}_2\text{O}$ , 4:5), В ( $\text{CH}_3\text{CN}$ ), градиент насоса – от 100 % А до 100 % В за 50 мин, при дальнейшем пропускании В в течение 10 мин, температура термостата колонки 25 °С. Детектировали одновременно по 4 каналам при следующих параметрах: А –  $\lambda_{\text{ex}}=256$ ,  $\lambda_{\text{em}}=370$ ; В –  $\lambda_{\text{ex}}=260$ ,  $\lambda_{\text{em}}=420$ ; С –  $\lambda_{\text{ex}}=275$ ,  $\lambda_{\text{em}}=420$ ; D –  $\lambda_{\text{ex}}=290$ ,  $\lambda_{\text{em}}=430$  нм; аттенуация детектора (усиление фотоумножителя) – 64; полярность детектора – положительная; сигнал выхода – эмиссия. Чувствительность данной методики для ПАУ составляет 0,01 нг/дм<sup>3</sup> при степени концентрирования (1,4–2,8)·10<sup>3</sup>.

Разработанная методика определения ПАУ методом ВЭЖХ/ФД позволяет определить концентрации указанных соединений на грубой и тонкой фракциях взвешенных частиц в природной воде и их водорастворимую часть.

### **Результаты исследований и их обсуждение**

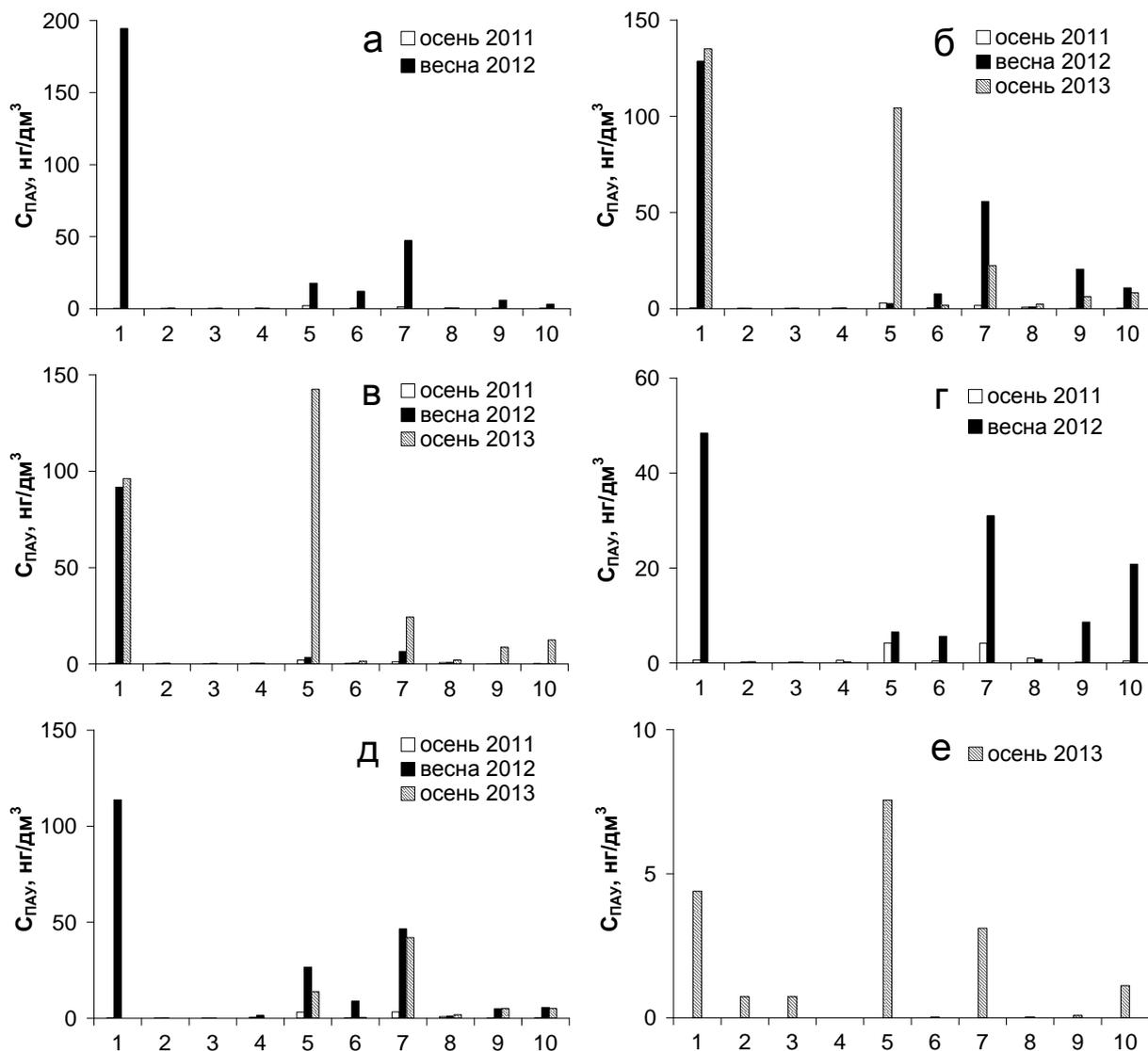
**Мониторинг легких ПАУ в природной воде р. Днепр.** Выполнено определение 10 легких ПАУ в образцах природной воды р. Днепр в районе Киева из 6 точек отбора, причем данные получены для образцов из точек 1–5 (осень 2011 и весна 2012 гг.) и дополнительно для образцов из точек 2, 3, 5, 6 (осень 2013 г.). На рис. 1 представлены уровни содержания исследованных легких ПАУ (нафталин, аценафтилен, аценафтен, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, бенз(*a*)антрацен, хризен) в природной воде р. Днепр в точках мониторинга за 2011–2013 гг.

Практически во всех образцах наивысшие концентрации были зафиксированы для нафталина, фенантрена и флуорантена. Они составили, соответственно, нг/дм<sup>3</sup>: 0.1–0.6, 2.0–4.2, 1.1–4.1 осенью 2011 г.; 48.4–194.5, 2.6–26.6, 6.5–55.7 весной 2012 г.; 0–135.0, 7.5–142.5, 3.1–41.2 осенью 2013 г. Концентрации аценафтилена, аценафтена и флуорена оказались незначительными (< 2 нг/дм<sup>3</sup>), причем эти ПАУ не были детектированы примерно в четверти исследуемых образцов. Антрацен, пирен и хризен были обнаружены во всех образцах, а их концентрации составили, соответственно, нг/дм<sup>3</sup>: 0.2–0.4, 0.6–1.0, 0.2–0.4 – осенью 2011 г.; 0.4–12.0, 0.4–1.1, 0.1–20.8 – весной 2012 г.; 0.1–1.7, 0.1–2.3, 1.1–12.4 – осенью 2013 г. Концентрации бенз(*a*)антрацена, наиболее токсического из легких ПАУ, нг/дм<sup>3</sup>: 0.1–0.3 осенью 2011 г., 0.2–20.5 весной 2012 г., 0.1–8.6 осенью 2013 г.

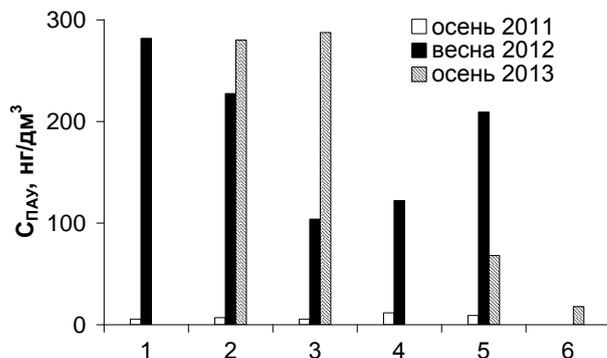
Исходя из соотношения индивидуальных ПАУ в природной воде можно получить некоторые сведения об источнике загрязнения. Для большинства проб воды маркерные соотношения антрацен / (антрацен + пирен), флуорантен / (флуорантен + пирен), бенз(*a*)антрацен / (бенз(*a*)антрацен + хризен) составили, соответственно, больше 0.1, 0.5, 0.35. Это указывает на то, что для природной воды р. Днепр характерно преобладание техногенной составляющей в структуре ПАУ, обусловленной процессами горения органического вещества (угля, древесины, нефтепродуктов и др.). Однако в образцах, отобранных осенью 2013 г., соотношение антрацен / (антрацен + пирен) оказалось ниже 0.1, что может свидетельствовать о нефтяном источнике поступления ПАУ в природную воду р. Днепр.

На рис. 2 показаны общие концентрации легких ПАУ в точках 1–6. В точках мониторинга 1–5 их суммарные концентрации осенью 2011 г. и весной 2012 г. равны, соответственно, 5.5, 6.9, 5.5, 11.7, 9.1 нг/дм<sup>3</sup>; 281.7, 227.4, 103.9, 122.2, 209.2 нг/дм<sup>3</sup>. Для

образцов, отобранных осенью 2013 г. в точках мониторинга 2, 3, 5, 6, получены следующие результаты: 280.0, 287.4, 68.0, 17.8 нг/дм<sup>3</sup>.



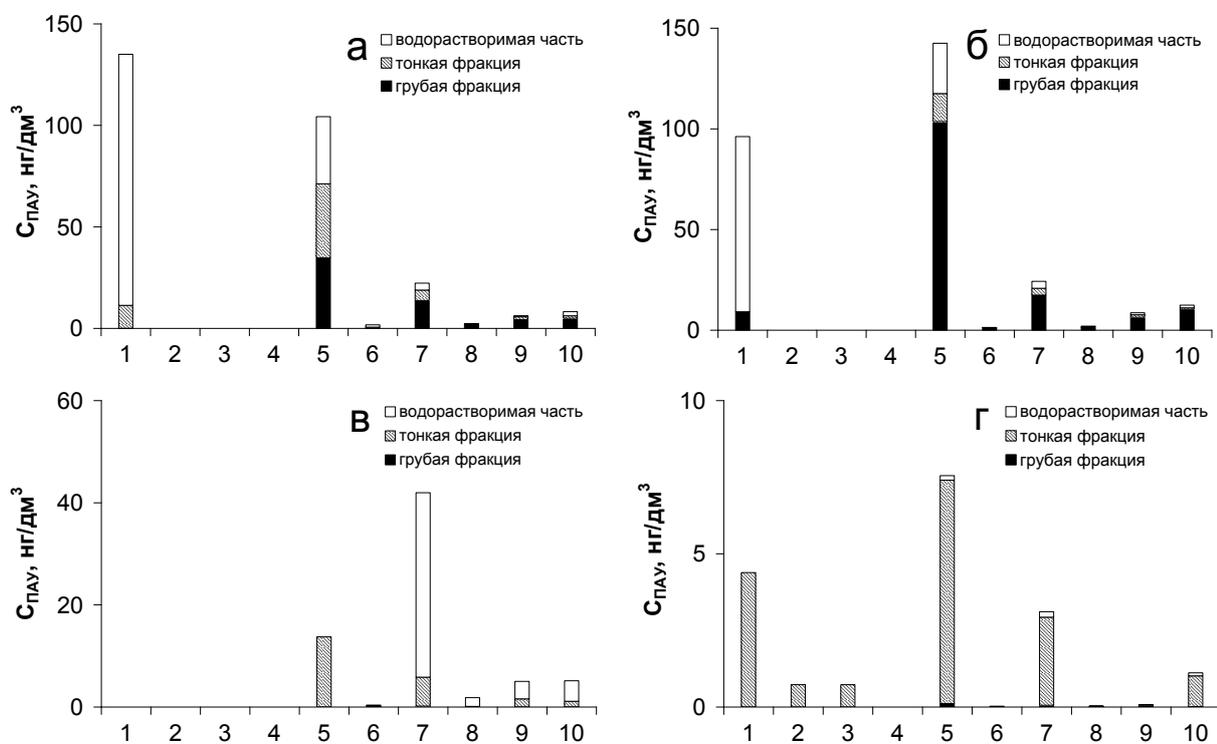
**Рис. 1.** Концентрации индивидуальных легких ПАУ в природной воде р. Днепр в точках мониторинга за 2011–2013 гг. (а — точка 1, б — 2, в — 3, г — 4, д — 5, е — 6). Соединения: 1 – нафталин, 2 – аценафтилен, 3 – аценафтен, 4 – флуорен, 5 – фенантрен, 6 – антрацен, 7 – флуорантен, 8 – пирен, 9 – бенз(а)антрацен, 10 – хризен.



**Рис. 2.** Общие концентрации легких ПАУ в природной воде р. Днепр в точках мониторинга 1–6 за 2011–2013 гг.

Зафиксированные концентрации легких ПАУ в природной воде р. Днепр не являются высокими по сравнению с другими водными системами. Так, в реках Китая концентрации данных соединений значительно выше. Например, максимальные концентрации нафталина, фенантрена и флуорантена, приведенные в статье [8], составили, соответственно, 470, 399, 2611 нг/дм<sup>3</sup>. Суммарные концентрации легких ПАУ в Азовском море не превысили 300 нг/дм<sup>3</sup> [25], и оказались соизмеримыми с концентрациями в р. Днепр. В то же время в реках Дальнего Востока детектированы более низкие концентрации данных соединений. Здесь суммарные концентрации легких ПАУ составили всего 3.6–15.2 нг/дм<sup>3</sup> [9].

**Дисперсно-фазовое распределение легких ПАУ в природной воде р. Днепр.** Исследовано распределение 10 легких ПАУ между водной фазой, тонкой фракцией взвешенных частиц (размер частиц > 0.45 и < 16–24 мкм) и грубой фракцией взвешенных частиц (> 16–24 мкм) в образцах, отобранных осенью 2013 г. в точках мониторинга 2, 3, 5, 6. На рис. 3 представлено распределение индивидуальных легких ПАУ между водной фазой, тонкой фракцией взвешенных частиц и грубой фракцией взвешенных частиц в точках мониторинга 2, 3, 5, 6.

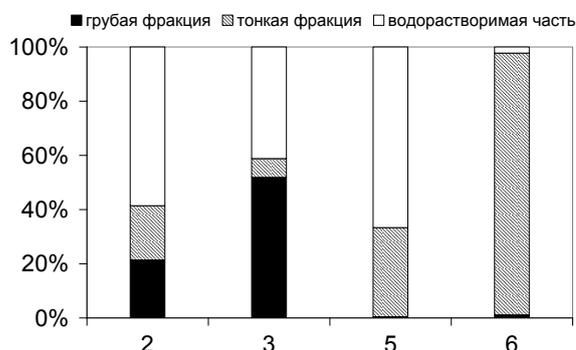


**Рис. 3.** Дисперсно-фазовое распределение индивидуальных легких ПАУ в природной воде р. Днепр в точках мониторинга 2, 3, 5, 6 (а – г, соответственно) за 2013 г. Обозначения соединений приведены в подписи к рис. 1.

По полученным данным установлено, что в природной воде р. Днепр более половины нафталина (в среднем – 61 %) содержится в водорастворимом состоянии. Более гидрофобные 3- и 4-кольцевые ПАУ, напротив, находятся преимущественно в связанном состоянии с взвешенными частицами. Так, водорастворимые части фенантрена, антрацена, флуорантена, пирена, бенз(а)антрацена, хризена составили в среднем, соответственно, 13, 28, 30, 32, 28, 31 %. Концентрации аценафтена, аценафтилена и флуорена в исследуемых пробах оказались незначительными и их дисперсно-фазовое распределение установить не удалось.

На рис. 4 приведено в процентном соотношении суммарное дисперсно-фазовое распределение легких ПАУ в точках мониторинга 2, 3, 5, 6. Доли ПАУ на грубой, тонкой фракциях взвешенных частиц и их водорастворимая часть составили 21, 20, 59 в точке 2

(рис. 3, а), 52, 7, 41 в точке 3 (рис. 3, б); 0, 33, 67 в точке 5 (рис. 3, в); 1, 97, 2 % в точке 6 (рис. 3, г). Таким образом, в природной воде р. Днепр доли легких ПАУ на грубой и тонкой фракциях взвешенных частиц усредненно составляют 19 и 39 %. Водорастворимая часть насчитывает в среднем 42 %.



**Рис. 4.** Суммарное дисперсно-фазовое распределение легких ПАУ в природной воде р. Днепр в точках мониторинга 2, 3, 5, 6 за 2013 г.

Полученные результаты по дисперсно-фазовому распределению легких ПАУ несколько отличаются от данных, приведенных в статье [7] для р. Эльба. Здесь водорастворимая часть нафталина превысила 80 %. В то же время водорастворимые доли фенантрена, антрацена, флуорантена, пирена, бенз(а)антрацена, хризена составили, так же как и в р. Днепр, 15–30 %. В общих чертах данные по дисперсно-фазовому распределению ПХБ в р. Днепр являются близкими с результатами, полученными в работах [6, 8, 9, 15]. В статье [6] отмечено, что ПАУ в природной воде склонны к ассоциации именно с тонкими взвешенными частицами, что подтверждают данные, полученные для р. Днепр. Здесь на долю тонкой фракции приходится более половины (в среднем – 65 %) от общего количества суспендированных ПАУ.

### Выводы

Определены концентрации 10 легких ПАУ, а также изучено их дисперсно-фазовое распределение в природной воде р. Днепр возле Киева. Общая концентрация данных соединений составляет 5.5–287.4 нг/дм<sup>3</sup>, причем наивысшие концентрации были зафиксированы для нафталина, фенантрена и флуорантена. Исходя из соотношения индивидуальных соединений можно сделать вывод о том, что источником поступления ПАУ в природную воду р. Днепр являются процессы горения органических веществ (угля, древесины, нефтепродуктов).

Показано, что в природной воде р. Днепр легкие ПАУ, за исключением нафталина, находятся преимущественно в связанном состоянии с взвешенными частицами.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Миллюкин М.В., Гончарук В.В.** Химический мониторинг органических экотоксикантов в водных системах. Київ: Наук. думка, 2016. 309 с.
2. **Майстренко В.Н., Хамитов Р.З., Будников Г.К.** Эколого-аналитический мониторинг суперэкотоксикантов. М.: Химия, 1996. 318 с.
3. **Басова Е.М., Иванов В.М.** Современное состояние высокоэффективной жидкостной хроматографии полициклических ароматических углеводородов. *Вестн. Москов. ун-та. Сер.: Химия.* 2011. Т. 52, № 3. С. 163–174.

4. **Милюкин М.В., Скринник М.М., Горбань М.В.** Определение параметров сорбции органических токсикантов, солюбилизованных TRITON X-100, при их концентрировании пористыми полимерными сорбентами из водных растворов. *Методы и объекты химического анализа*. 2015. Т. 10, № 4. С. 189–194.
5. **Линник П.Н.** Причины ухудшения качества воды в Киевском и Каневском водохранилищах. *Химия и технология воды*. 2003. Т. 25, № 4. С. 384–402.
6. **Liu F., Yang Q., Hu Y. et al.** Distribution and transportation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) at the Humen river mouth in the Pearl River delta and their influencing factors. *Marine Pollution Bull.* 2014. Vol. 84, № 1–2. P. 401–410.
7. **Heemken O.P., Stachel B., Theobald N., Wenclawiak B.W.** Temporal variability of organic micropollutants in suspended particulate matter of the River Elbe at Hamburg and the River Mulde at Dessau, Germany. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 2000. Vol. 38. P. 11–31.
8. **Feng C., Xia X., Shen Z., Zhou Z.** Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in Wuhan section of the Yangtze River, China. *Environ. Monit. Assess.* 2007. Vol. 133. P. 447–458.
9. **Чижова Т.Л., Кудряшова Ю.В., Прокуда Н.А., Тищенко П.Я.** Распределение полициклических ароматических углеводородов в воде, взвеси и донных отложениях эстуариев рек залива Петра Великого. *Вестн. ДВО РАН*. 2013. Т. 6. С. 149–155.
10. **Guo W., He M., Yang Z. et al.** Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in water, suspended particulate matter and sediment from Daliao River watershed, China. *Chemosphere*. 2007. Vol. 68. P. 93–104.
11. **Luo X., Chen S., Mai B. et al.** Polycyclic aromatic hydrocarbons in suspended particulate matter and sediments from the Pearl River Estuary and adjacent coastal areas, China. *Environmental Pollution*. 2006. Vol. 139. P. 9–20.
12. **Maioli O.L.G., Rodrigues K.C., Knoppers B.A., Azevedo D.A.** Distribution and sources of aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons in suspended particulate matter in water from two Brazilian estuarine systems. *Continental Shelf Res.* 2011. Vol. 31. P. 1116–1127.
13. **Shi Z., Tao S., Pan B. et al.** Contamination of rivers in Tianjin, China by polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environmental Pollution*. 2005. Vol. 134. P. 97–111.
14. **Maldonado C., Bayona J.M., Bodineau L.** Sources, distribution and water column processes of aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons in the Northwestern Black Sea water. *Environmental Science and Technology*. 1999. Vol. 31, № 16. P. 2693–2702.
15. **Lim L., Wurl O., Karuppiah S., Obbard J.P.** Atmospheric wet deposition of PAHs to the sea-surface microlayer. *Marine Pollution Bull.* 2007. Vol. 54. P. 1212–1219.
16. **Qiao M., Huang S., Wang Z.** Partitioning characteristics of PAHs between sediment and water in a shallow lake. *J. Soils and Sediments*. 2008. Vol. 8, № 2. P. 69–73.
17. **Qin N., He W., Kong X. et al.** Distribution, partitioning and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in the water-SPM-sediment system of Lake Chaohu, China. *Science of the Total Environment*. 2014. Vol. 496. P. 414–423.
18. **Qi W., Qu J., Liu H. et al.** Partitioning and sources of PAHs in wastewater receiving streams of Tianjin, China. *Environ. Monit. Assess.* 2012. Vol. 184. P. 1847–1855.
19. **Милюкин М.В., Горбань М.В.** Мониторинг и дисперсно-фазовое распределение хлорорганических пестицидов в природной воде. *Методы и объекты химического анализа*. 2016. Т. 11, № 1. С. 25–30.
20. **Милюкин М.В., Горбань М.В., Скринник М.М.** Мониторинг и дисперсно-фазовое распределение полихлорированных бифенилов в природной воде. *Методы и объекты химического анализа* Т. 11, № 2. С. 99–105.
21. **Eastcott L., Shiu W.Y., Mackay D.** Environmentally relevant physical-chemical properties of hydrocarbons: a review of data and development of simple correlations. *Oil and Chemical Pollution*. 1988. Vol. 4. P. 191–216.
22. **De Maagd P.G.J., ten Hulscher D.T.E.M., van den Heuvel H. et al.** Physicochemical properties of polycyclic aromatic hydrocarbons: aqueous solubilities, n-octanol/water partition

- coefficients, and Henry's law constants. *Environ. Toxicol. and Chem.* 1998. Vol. 17, № 2. P. 251–257.
23. **Lei Y.D., Chankalal R., Chan A., Wania F.** Supercooled liquid vapour pressures of the polycyclic aromatic hydrocarbons. *J. Chem. Eng. Data.* 2002. Vol. 47. P. 801–806.
24. **Павленко Л.Ф., Скрыпник Г.В., Кленкин А.А., Корпакова И.Г.** Загрязнение Азовского моря полиароматическими углеводородами. *Вопросы рыболовства.* 2008. Т. 9, № 4. С. 861–869.
25. **Халиков И.С.** Содержание ПАУ в донных отложениях озера Байкал в районе Селенгинского мелководья. *Научный альманах. Сер.: Хим. науки.* 2016. Т. 15, № 1–2. С. 447–451.

*Інститут колоїдної хімії і хімії води імені А.В. Думанського НАН України, м. Київ*

*Надійшло до редакції  
25.10.2016*