



Оригинальная статья / Original article

УДК 556+502/504

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-167-173>



Идентификация природных и техногенных процессов в подземной гидросфере на основе анализа полиаренов

© А.П. Хаустов^а, М.М. Редина^б

^{а,б}Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия

Резюме: Цель работы заключалась в анализе возможности идентификации генезиса загрязнений подземной гидросферы на основе данных о полиаренах как геохимических маркерах. Маркерная роль обусловлена токсичностью, стойкостью, привязкой этих веществ к конкретным источникам загрязнения и процессам в природе и техносфере. Основным методом исследования являлся анализ индикаторных соотношений полиаренов. Объектом исследования служили подземные воды разных регионов мира, загрязненные природными и антропогенными полиаренами. В результате авторами показаны основные направления отечественных и зарубежных исследований и освещены проблемы их проведения. С применением индикаторных соотношений успешно распознаны пирогенно и петрогенно загрязненные пробы подземных вод и продемонстрированы примеры изучения полиаренов как геохимических маркеров. Установлено, что полиарены являются эффективным индикатором генезиса загрязнений подземной гидросферы. Тем не менее их анализ требует применения современных методов отбора, подготовки проб, экстракции, что значительно осложняет исследования на практике.

Ключевые слова: подземная гидросфера, подземные воды, полициклические ароматические углеводороды, техногенез, загрязнение

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства Российского университета дружбы народов.

Для цитирования: Хаустов А.П., Редина М.М. Идентификация природных и техногенных процессов в подземной гидросфере на основе анализа полиаренов. *Науки о Земле и недропользование*. 2021. Т. 44. № 2. С. 167–173. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-167-173>

Polyarene analysis-based identification of natural and technogenic processes in underground hydrosphere

© Alexander P. Khaustov^а, Margarita M. Redina^б

^{а,б}RUDN University, Moscow, Russia

Abstract: The purpose of the study is to analyze the possibility to identify the pollution genesis of the underground hydrosphere based on the data on polyarenes as geochemical markers. Their marker role is due to their toxicity, persistence and confinement to specific pollution sources and natural and technogenic processes. The main research method is the analysis of indicator ratios of polyarenes. The object of research is groundwater from different regions of the world, which are polluted by natural and anthropogenic polyarenes. The main directions of domestic and foreign researches as well as the problems of their implementation are shown. The use of indicator ratios enabled successful identification of pyro- and petrogenically polluted samples of groundwater also the examples of the study of polyarenes as geochemical markers were demonstrated. The polyarenes are shown to be an effective indicator of the pollution genesis in the underground hydrosphere. However, their analysis requires the use of modern methods of sampling, sample preparation and extraction, which significantly complicates research in practice.

Keywords: underground hydrosphere, groundwater, polycyclic aromatic hydrocarbons, technogenesis, pollution

Acknowledgements: The research was supported by the Strategic Academic Leadership Program of the Peoples' Friendship University of Russia (RUDN).

For citation: Khaustov AP, Redina MM. Polyarene analysis-based identification of natural and technogenic processes in underground hydrosphere. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(2):167–173. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-167-173>



Введение

Индикаторная роль полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) для идентификации природных и антропогенных процессов исследуется более 40 лет. Первые оценки для загрязненных промышленных районов (работы 70-х гг. XX века) являлись результатами исследований динамики загрязнения подземной гидросферы в зоне влияния промышленного объекта (производство смол) [1 и др.]. Интерес к ПАУ вызван их токсичностью, стойкостью в окружающей среде, способностью мигрировать на дальние расстояния, а также маркировать природные и антропогенные процессы. Обнаружение ПАУ в изучаемых объектах в определенных концентрациях и соотношениях позволяет определить источник, удаленность точки отбора проб от конкретных источников, выявить техногенный или природный генезис загрязнения.

Современные публикации по анализу и интерпретации количественных оценок ПАУ в подземной гидросфере посвящены целому ряду вопросов.

Одним из них является оценка общего уровня загрязнения подземных вод ПАУ и его динамики в связи с сезонностью инфильтрации либо удаленностью от источника. В ходе изучения данной темы отмечены максимумы суммы 16 ПАУ ($\Sigma 16\text{ПАУ}$) 3 мг/л [2, 3] (из них 2,8 – нафталин за счет сравнительно более высокой растворимости). В работе [4] для крупного индустриального района выявлено закономерное снижение $\Sigma 16\text{ПАУ}$ с глубиной при среднем значении 1420 нг/дм³ и высоком среднем значении экологического риска.

Другим важным вопросом для исследования стало создание моделей взаимодействия компонентов подземной гидросферы друг с другом и с сопредельными средами; моделей транспорта, накопления, трансформации ПАУ. Так, в статье [5] оценена возможность проникновения ПАУ (пирена) в грунтовые воды в течение 100 лет сквозь 6-метровую слабопроницаемую зону аэрации (с поверхности изолирована грунтами со строительным мусором и глинами, далее по разрезу – супеси и суглинки). Показана обратная зависимость скорости деградации ПАУ от массы молекул.

Уделено внимание также моделированию загрязнений подземной гидросферы ПАУ в специфических условиях: для карстовых пород, в условиях курортных зон (с учетом перспектив использования вод); при разливах нефти и нефтепродуктов; при пожарах и т. д., а также идентификации преобладающих источников загрязнения в общем потоке поллютантов. Так, в зоне пожаров в Португалии выявлены 15 из 16 контролируемых ПАУ в подземных водах [6]. Общая $\Sigma 16\text{ПАУ}$ в районах пожаров – 23,1–95,1 нг/дм³ (среднее – 62,9 нг /дм³), что в 1–6 раз выше среднего уровня в контрольном районе, а среди набора ПАУ преобладают 5-6-кольцевые. Это позволяет оценить размеры зоны влияния пожаров как источника загрязнения.

Идентификация процессов накопления ПАУ и анализ факторов деградации (адсорбция, бактериальное разложение, фотолитиз и др.) рассмотрены, например, в работе [7]: здесь для четырех эпикарстовых водосборов на юго-западе Китая оценены вертикальная миграция и сезонные колебания ПАУ из почв в подземные воды и риски загрязнения. Вертикальное распределение коррелирует с токсичными органическими соединениями в почвах на малых высотах, а почвы породы слабо сорбируют многокольцевые ПАУ.

Оценка рисков для здоровья населения при загрязнении подземных вод ПАУ проанализирована в числе прочих в работе [8]: авторами выявлен значительный риск канцерогенных заболеваний населения (сельские районы восточного Китая) за счет загрязнения при сжигании ископаемого топлива.

Также рассматриваются технологии очистки вод (фотодеградация, включая ультрафиолетовое облучение; искусственные барьеры, в том числе биобарьеры), технологии и методы экологического (гидрогеоэкологического) мониторинга.

В России отмечают единичные исследования. Впервые данные о ПАУ в пресных подземных водах с методикой анализа были приведены в работе Ю.П. Турова и др. 1999 г. [9]. В данной публикации показано, что слабая защищенность водоносных горизонтов в подземных водах региона до глубин 230 м обусловила высокие концентрации ПАУ



(до 18 мкг/дм³), фенолов (до 29 мкг/дм³), парафинов (до 48 мкг/дм³). Кроме того, в одной из скважин томского водозабора зафиксированы 18-кратные превышения нормативов бенз(а)пирена. В работах Ю.И. Пиковского [10 и др.] подчеркивались высокие индикационные свойства ПАУ в гидротермальных процессах. В целом внимание к проблемам мониторинга и анализа присутствия ПАУ в подземной гидросфере в отечественных исследованиях недостаточно.

В связи с вышеизложенным целью представленного исследования являлся анализ возможности идентификации генезиса загрязнений подземной гидросферы на основе данных о ПАУ как геохимических маркерах.

Материал и методы исследования

Предлагаемое исследование основано на обзоре литературных источников о содержании ПАУ в подземной гидросфере в регионах мира в различных условиях техногенной нагрузки и на собственных данных авторов о содержании ПАУ в природных источниках подземных вод Крымского полуострова.

ПАУ – это группа относительно стойких органических загрязнителей, состоящих из двух и более бензольных колец, с канцерогенными и мутагенными свойствами. На практике для контроля в окружающей среде используют несколько перечней ПАУ: в перечне Евросоюза – 4 обязательных соединения¹; в перечне Агентства по охране окружающей среды США (англ.: *United States Environmental Protection Agency*) – 16 веществ². Нормативы содержания ПАУ для питьевых вод и поверхностных водных объектов в странах мира весьма различны. В некоторых работах вводится «максимально допустимый предел» в 10 мкг/дм³, рекомендованный для обеспечения безопасности грунтовых вод, что чрезвычайно много и не обосновано однозначно. Агентством по охране окружающей среды США для Σ16ПАУ в питьевых водах установлена норма 200 нг/дм³. Директива Евросоюза определяет

норму 100 нг/дм³ для Σ4ПАУ, отдельно нормируется бенз(а)пирен (10 нг/дм³). В России нормируются лишь концентрации в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования нафталина (10 мкг/дм³) и бенз(а)пирена (10 нг/дм³). Для расфасованных питьевых вод установлен норматив бенз(а)пирена 5 нг/дм³ (первая категория) и 1 нг/дм³ (высшая категория). Прочие ПАУ в отечественной практике не являются объектом обязательного наблюдения.

Крайне малые концентрации, сложности экстракции и определения ПАУ в воде порождают большие погрешности анализа. Это сдерживает широкое применение ПАУ как индикаторов в прикладных задачах гидрогеологии [11, 12 и др.]. Оптимально анализ с использованием высокоэффективной хроматографии и масс-спектрометрии. Наибольшие ошибки (до 80–90 %) возникают при пробоотборе, хранении и экстракции проб; только 10 % – при измерении сигнала. Наш эксперимент показал, что при пробоотборе в темные новые полиэтиленерефталатовые упаковки идет активное выщелачивание значительных количеств большинства ПАУ за счет агрессивности вод [13]. В связи с этим пробоотбор должен проводиться в темное стекло с фиксацией гексаном или кислотой, с предпочтительно твердофазной экстракцией на специальные «патроны». Анализ ПАУ в подземных водах регламентирован ПНД Ф 14.1:2.4.70-96 «Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовых концентраций полициклических ароматических углеводородов в питьевых, природных и сточных водах методом высокоэффективной жидкостной хроматографии». Это актуальный документ, но устаревшие методы экстракции делают результаты неточными. С 2016 г. для атмосферных осадков и поверхностных вод действует РД 52.44.590-2016 «Массовая концентрация приоритетных компонентов полициклических ароматических углеводородов в пробах атмосферных осадков и поверхностных вод. Методика измерений методом высокоэффективной

¹ Бенз(а)пирен (BaP), бенз(б)флуорантен (BbFlu), бенз(к)флуорантен (BkFlu) и индено(1,2,3-сд)пирен (IP).

² Нафталин (Naph), аценафтен (Ace), аценафтилен (Acn), флуорен (Fluo), антранцен (An), фененатрен (Phen), флуорантен (Flu), пирен (Py), хризен (Chr), бенз(а)антрацен (BaA), BaP, BbFlu, BkFlu, дибенз(а, h)антрацен (DbA), IP, бенз(г, h, i)перилен (Bghi)



жидкостной хроматографии». Формально он не применим к подземным водам, но результаты точнее за счет более полной экстракции.

Индикаторные соотношения ПАУ позволяют определить характер их источника загрязнения. Традиционно применяют:

- отношения концентраций «кинетических» и «термодинамических» изомеров ПАУ одной молекулярной массы;
- отношения сумм концентраций легких ПАУ к многокольцевым;
- доли концентраций ПАУ, характеризующих конкретные техногенные процессы (типы производств).

Для соотношений известны границы между пиро- и петрогенными процессами; значения, соответствующие конкретным технологиям, техногенным источникам, удаленности от источника загрязнения. Наиболее распространены соотношения: $F_{lu} / (F_{lu} + P_{y})$ с границей между пиро- и петрогенными процессами 0,1 и $A_{n} / (A_{n} + P_{he})$ с границей 0,5.

Объектами анализа в данном исследовании стали содержащие ПАУ природные источники (грязевой вулкан, пресный источник, рапа соленого озера на Крымском полуострове); подземные воды под свалками гудрона в Германии [14], в промышленном центре в Боснии [4], в мегаполисе в Индии [15], в сельских районах Индии [16] и Китае [8], в зоне лесных пожаров в Португалии [6], на газовом заводе в Соединенных Штатах Америки [1];

в источниках выхода нефтесодержащих вод («гидротермальная нефть») в Калифорнийском заливе Соединенных Штатов Америки [17].

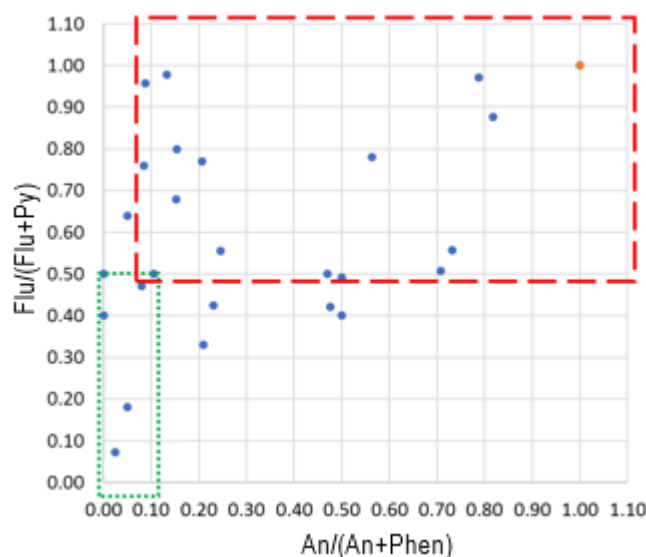
Результаты исследования и их обсуждение

Распределение проб в плоскости индикаторных соотношений с выделением явно пирогенной (высокотемпературные процессы образования загрязнений) и петрогенной (низкотемпературные процессы) областей показано на рисунке.

В явно пирогенной зоне – точки, соответствующие загрязнениям вследствие пожаров, размещения отходов на городских свалках, хранилища промышленных отходов; в петрогенной – «гидротермальные нефти», загрязнения в индустриальном районе Боснии, природные источники Керченского полуострова. Для точек за пределами выделенных зон необходим дополнительный анализ, включая применение дополнительных индикаторных соотношений [18–21], более четко определяющих характер источника.

Заключение

ПАУ – эффективные индикаторы природных и техногенных процессов в подземной гидросфере, однако исследования их в отечественной практике редки. Одной из причин сложившейся ситуации является сложность аналитических определений. Не уделяется



Оценка генезиса загрязнений подземных вод на основе индикаторных соотношений

Красным пунктиром выделена пирогенная область, зеленым – петрогенная

Assessment of groundwater pollution genesis based on indicator ratios

Red dotted line indicates the pyrogenic area, green dotted line – the petrogenic area



должного внимания пробоотбору, хранению и экстракции ПАУ из водных растворов. Недочет липофильности и сорбционных свойств ПАУ ко всему прочему становится причиной серьезных ошибок при моделировании потоков загрязнителей.

Поведение ПАУ в растворах (а в подземной гидросфере тем более) во многом обусловлено их физико-химическими свойствами, подверженностью фотоллизу и окислению

микробиотой по сравнению с их поведением в других средах.

Низкая эффективность экстракции и ошибки аналитических определений, физико-химические процессы поведения ПАУ в системе «вода – породы – органическое вещество» приводят к тому, что большинство ранних количественных оценок и моделей требует ревизии, особенно при идентификации источников загрязнения.

Список литературы

1. Mattox C.F., Humenick M.J. Organic groundwater contaminants from UCG // Proceedings of the 5th Underground Coal Conversion Symposium. Alexandria, 1979.
2. Richard D.E., Dwyer D.F. Aerated biofiltration for simultaneous removal of iron and polycyclic aromatic hydrocarbons from groundwater // Water Environment Research. 2001. Vol. 73. Iss. 6. P. 673–683. <https://doi.org/10.2175/106143001x143411>
3. Groher D.M. An investigation of factors affecting the concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons in groundwater at coal tar waste sites. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1990. 145 p.
4. Ilić P., Nešković Markić D., Stojanović Bjelić L. Evaluation of sources and ecological risk of PAHs in different layers of soil and groundwater // Preprints. 2020. <https://doi.org/10.20944/preprints202002.0224.v1>
5. Галицкая И.В., Позднякова И.А. К проблеме загрязнения подземных вод и пород зоны аэрации нефтепродуктами и ПАУ на городских территориях // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2011. № 4. С. 337–343.
6. Mansilha C., Carvalho A., Guimarães P., Espinha Marques J. Water quality concerns due to forest fires: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) contamination of groundwater from mountain areas // Journal of Toxicology and Environmental Health. Part A. 2014. Vol. 77. Iss. 14–16. P. 806–815. <https://doi.org/10.1080/15287394.2014.909301>
7. Sun Y., Zhang S., Lan J., Xie Z., Pu J., Yuan D., et al. Vertical migration from surface soils to groundwater and source appointment of polycyclic aromatic hydrocarbons in epikarst spring systems, southwest China // Chemosphere. 2019. Vol. 230. P. 616–627. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.007>
8. Liang M., Liang H., Rao Z., Xu D. Occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons in groundwater from rural areas in eastern China: spatial distribution, source apportionment and health cancer risk assessment // Chemosphere. 2020. Vol. 259. P. 127534. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127534>
9. Туров Ю.П., Кадычагов П.Б., Гузньева М.Ю., Алшанский А.М. Полициклические ароматические углеводороды в подземных водах и почвах Обь-Томского междуречья // Химия в интересах устойчивого развития. 1999. № 7. С. 291–299.
10. Пиковский Ю.И. Природные и техногенные потоки углеводов в окружающей среде: монография. М.: Изд-во МГУ, 1993. 208 с.
11. Хаустов А.П., Редина М.М., Яковлева Е.В. Воплощения подземных вод как геохимические системообразующие объекты (интерпретация на основе распределения ПАУ) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2018. № 3. С. 3–17.
12. Хаустов А.П., Редина М.М. Парадоксы концентрирования углеводов в компонентах геосистем (на примере ПАУ) // Сергеевские чтения: геоэкологические аспекты реализации национального проекта «Экология». Диалог поколений: материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Вып. 22. М., 2020. С. 94–103.
13. Khaustov A., Redina M., Goryainov S. Migration of PAHs and phthalates from package materials during water storage: glass or plastic? // Polycyclic Aromatic Compounds. 2020. P. 1–13. <https://doi.org/10.1080/10406638.2020.1734033>
14. Schlages I., Meyer D., Palm W.U., Ruck W. Identification, quantification and distribution of PAC-metabolites, heterocyclic PAC and substituted PAC in groundwater samples of tar-contaminated sites from Germany // Polycyclic Aromatic Compounds. 2008. Vol. 28. Iss. 4–5. P. 320–338. <https://doi.org/10.1080/10406630802377807>
15. Masih A., Lal J.K. Concentrations and carcinogenic profiles of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in groundwater of an urban site at a Terai belt of North India // International Journal of Applied Engineering Research. 2014. Vol. 9. Iss. 1. P. 1–8.
16. Masih A., Saini R., Taneja A. Contamination and exposure profiles of priority polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in groundwater in a semi-arid region in India // International Journal of Water. 2008. Vol. 4. Iss. 1–2. P. 136–147. <https://doi.org/10.1504/IJW.2008.018152>
17. Kawka O.E.M. Hydrothermal alteration of sedimentary organic matter in Guaymas Basin, Gulf of California. Corvallis: Oregon State University, 1990. 236 p.
18. Khaustov A.P., Redina M.M. Indicator ratios of polycyclic aromatic hydrocarbons for geoenvironmental studies of natural and technogenic objects // Water Resources. 2017. Vol. 44. Iss. 7. P. 903–913. <https://doi.org/10.1134/S0097807817070065>



19. Moyo S., McCrindle R., Mokgalaka N., Myburgh J., Mujuru M. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from polluted rivers // *Pure and Applied Chemistry*. 2013. Vol. 85. Iss. 12. P. 2175–2196. <https://doi.org/10.1351/pac-con-12-10-08>

20. Soclo H.H., Garrigues P., Ewald M. Origin of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coastal marine sediments: case studies in Cotonou (Benin) and Aquitaine

(France) areas // *Marine Pollution Bulletin*. 2020. Vol. 40. Iss. 5. P. 387–396. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(99\)00200-3](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(99)00200-3)

21. Țigănuș D., Coatu V., Lazăr L., Oros A., Spînu A.D. Identification of the sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from the Romanian Black Sea sector // *Revista Cercetări Marine*. 2013. Vol. 43. Iss. 1. P. 187–196.

References

1. Mattox CF, Humenick MJ. Organic groundwater contaminants from UCG. In: *Proceedings of the 5th Underground Coal Conversion Symposium*. Alexandria; 1979.

2. Richard DE, Dwyer DF. Aerated biofiltration for simultaneous removal of iron and polycyclic aromatic hydrocarbons from groundwater. *Water Environment Research*. 2001;73(6):673–683. <https://doi.org/10.2175/106143001x143411>

3. Groher DM. *An investigation of factors affecting the concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons in groundwater at coal tar waste sites*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology; 1990. 145 p.

4. Ilić P, Nešković Markić D, Stojanović Bjelić L. Evaluation of sources and ecological risk of PAHs in different layers of soil and groundwater. *Preprints*. 2020. <https://doi.org/10.20944/preprints202002.0224.v1>

5. Galitskaya IV, Pozdnyakova IA. Contamination of groundwater and unsaturated zone deposits with oil products and PAH in urban areas. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*. 2011;4:337–343. (In Russ.)

6. Mansilha C, Carvalho A, Guimarães P, Espinha Marques J. Water quality concerns due to forest fires: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) contamination of groundwater from mountain areas. *Journal of Toxicology and Environmental Health. Part A*. 2014;77(14–16):806–815. <https://doi.org/10.1080/15287394.2014.909301>

7. Sun Y, Zhang S, Lan J, Xie Z, Pu J, Yuan D, et al. Vertical migration from surface soils to groundwater and source appointment of polycyclic aromatic hydrocarbons in epikarst spring systems, southwest China. *Chemosphere*. 2019;230:616–627. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.007>

8. Liang M, Liang H, Rao Z, Xu D. Occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons in groundwater from rural areas in eastern China: spatial distribution, source apportionment and health cancer risk assessment. *Chemosphere*. 2020;259:127534. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127534>

9. Turov YuP, Kadychagov PB, Guznayeva MYu, Al'shanskii AM. Polycyclic aromatic hydrocarbons in groundwater and soils of the Ob-Tomsk interfluvium. *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya*. 1999;7:291–299. (In Russ.)

10. Pikovskii Yul. *Natural and technogenic flows of hydrocarbons in the environment*. Moscow: Lomonosov Moscow State University; 1993. 208 p. (In Russ.)

11. Khaustov AP, Redina MM, Yakovleva EV. Groundwater sources as geochemical system-creating objects (interpretation based on PAH distribution). *Geoekologiya.*

Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya. 2018;3:3–17. (In Russ.)

12. Khaustov AP, Redina MM. Paradoxes of hydrocarbons concentration in geosystem components (for the case of PAH). In: *Sergeevskie chteniya: geoekologicheskie aspekty realizatsii natsional'nogo proekta "Ekologiya". Dialog pokolenii: materialy godichnoi sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoi geologii i gidrogeologii = Sergeevskie readings: geoecological aspects of the implementation of the national project "Ecology". Dialogue of generations: materials of the annual session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on the problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology*. Iss. 22. Moscow; 2020. p.94–103. (In Russ.)

13. Khaustov A, Redina M, Goryainov S. Migration of PAHs and phthalates from package materials during water storage: glass or plastic? *Polycyclic Aromatic Compounds*. 2020;1–13. <https://doi.org/10.1080/10406638.2020.1734033>

14. Schlanges I, Meyer D, Palm WU, Ruck W. Identification, quantification and distribution of PAC-metabolites, heterocyclic PAC and substituted PAC in groundwater samples of tar-contaminated sites from Germany. *Polycyclic Aromatic Compounds*. 2008;28(4–5):320–338. <https://doi.org/10.1080/10406630802377807>

15. Masih A, Lal JK. Concentrations and carcinogenic profiles of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in groundwater of an urban site at a Terai belt of North India. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2014;9(1):1–8.

16. Masih A, Saini R, Taneja A. Contamination and exposure profiles of priority polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in groundwater in a semi-arid region in India. *International Journal of Water*. 2008;4(1–2):136–147. <https://doi.org/10.1504/IJW.2008.018152>

17. Kawka OEM. *Hydrothermal alteration of sedimentary organic matter in Guaymas Basin, Gulf of California*. Corvallis: Oregon State University; 1990. 236 p.

18. Khaustov AP, Redina MM. Indicator ratios of polycyclic aromatic hydrocarbons for geoenvironmental studies of natural and technogenic objects. *Water Resources*. 2017;44(7):903–913. <https://doi.org/10.1134/S0097807817070065>

19. Moyo S, McCrindle R, Mokgalaka N, Myburgh J, Mujuru M. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from polluted rivers. *Pure and Applied Chemistry*. 2013;85(12):2175–2196. <https://doi.org/10.1351/pac-con-12-10-08>



20. Soclo HH, Garrigues P, Ewald M. Origin of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coastal marine sediments: case studies in Cotonou (Benin) and Aquitaine (France) areas. *Marine Pollution Bulletin*. 2020;40(5):387–396. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(99\)00200-3](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(99)00200-3)

21. Țigănuș D, Coatu V, Lazăr L, Oros A, Spînu AD. Identification of the sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from the Romanian Black Sea sector. *Revista Cercetări Marine*. 2013;43(1):187–196.

Сведения об авторах / Information about the authors



Хаустов Александр Петрович,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
профессор кафедры прикладной экологии,
Российский университет дружбы народов,
117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, Россия,
✉ e-mail: khaustov-ap@rudn.ru
ORCID: 0000-0002-5338-3960
Alexander P. Khaustov,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,
Professor of the Department of Applied Ecology,
RUDN University,
6 Miklukho-Maklaya St., Moscow 117198, Russia,
✉ e-mail: khaustov-ap@rudn.ru
ORCID: 0000-0002-5338-3960



Редина Маргарита Михайловна,
доктор экономических наук, доцент,
заведующая кафедрой прикладной экологии,
Российский университет дружбы народов,
117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, Россия,
e-mail: redina-mm@rudn.ru
ORCID: 0000-0002-3169-0142
Margarita M. Redina,
Dr. Sci. (Econ.), Associate Professor,
Head of the Department of Applied Ecology,
RUDN University,
6 Miklukho-Maklaya St., Moscow 117198, Russia,
e-mail: redina-mm@rudn.ru
ORCID: 0000-0002-3169-0142

Заявленный вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 04.03.2021; одобрена после рецензирования 08.04.2021; принята к публикации 11.05.2021.

The article was submitted 04.03.2021; approved after reviewing 08.04.2021; accepted for publication 11.05.2021.