УДК 631.45

DOI: 10.18522/2308-9709-2026-55-15

СОСТАВ И ИСТОЧНИКИ ПРОИСХОЖДЕНИЯ ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИХ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ПОЧВАХ БЫВШЕГО ХРАНИЛИЩА ЖИДКИХ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОКОВ

Барбашев А.И.[1]*, Дудникова Т.С.[1], Сушкова С.Н.[1], Минкина Т.М.[1], Попов В.Р.[1]

[1]*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия*

barbashev_andrei@mail.ru, ts-dudnikova@tyto98.ru, terra_rossa@mail.ru, tminkina@mail.ru, vpop@sfedu.ru

ORCID: 0000-0003-1857-948X, 0000-0002-8436-0198, 0000-0003-3470-9627, 0000-0003-3022-0883, 0009-0002-2481-5346

Аннотация

По окончанию эксплуатации пруды-шламонакопители являются вторичным источником загрязнения сопредельных сред. С использованием высокоэффективной жидкостной хроматографиии изучено содержание 12 приоритетных ПАУ в почвах бывшего шламонакопителя, расположенного в пойме р. Северский Донец, в пределах осушенного озера Атаманское. Показано, что медианное суммарное содержание ПАУ составляет 5520 нг/г, превышая фоновые значения в 16 раз. Почвы характеризуются чрезвычайно опасным уровнем загрязнения, а наибольший вклад в загрязнения вносят бенз(b)флуорантен, бенз(k)флуорантен, и дибенз(g,h,i)перилен.

Ключевые слова: ПАУ, загрязнение, почва, происхождение ПАУ

COMPOSITION AND ORIGIN SOURCES OF POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS IN SOILS OF A FORMER LIQUID INDUSTRIAL WASTE STORAGE FACILITY

Barbashev A.I.[1]*, Dudnikova T.S.[1], Sushkova S.N.[1], Minkina T.M.[1], Popov V.R.[1]

[1]*Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia*

barbashev_andrei@mail.ru, ts-dudnikova@tyto98.ru, terra_rossa@mail.ru, tminkina@mail.ru, vpop@sfedu.ru

ORCID: 0000-0003-1857-948X, 0000-0002-8436-0198, 0000-0003-3470-9627, 0000-0003-3022-0883, 0009-0002-2481-5346

Annotation

After the operation complete, sludge reservoirs become secondary sources of pollution for adjacent environments. Using high-performance liquid chromatography, the content of 12 priority PAHs was studied in the soils of a former sludge reservoir located in the floodplain of the Seversky Donets River, within the drained Lake Atamanskoe area. It was shown that the median total PAH content is 5520 ng/g, exceeding background values by 16 times. The soils are characterized by an extremely hazardous level of contamination, with the greatest contribution to pollution made by benzo(b)fluoranthene, benzo(k)fluoranthene, and dibenzo(g,h,i)perylene.

Keywords: PAHs, pollution, soil, origin of PAHs

Барбашев А. И., Дудникова Т. С., Сушкова С. Н., Минкина Т. М., Попов В. Р., Состав и источники происхождения полициклических ароматических углеводородов в почвах бывшего хранилища жидких промышленных стоков // «Живые и биокосные системы». – 2026. – № 55; URL: https://jbks.ru/archive/issue-55/article-15; DOI: 10.18522/2308-9709-2026-55-15

Введение

Почвы представляют собой важный ресурс, играющий центральную роль в создании многочисленных продуктов и услуг, неотъемлемо связанных с экосистемами и благополучием человека. Вне зависимости от воздействия, которому они подвергаются, все почвы выполняют функции, которые оказывают влияние на глобальный климат и водные ресурсы на различных масштабах. Они имеют фундаментальное значение для жизни на Земле, но антропогенное воздействие на почвенные ресурсы в настоящее время достигает критических значений (Maliszewska-Kordybach, 1999). Загрязнение почв главным образом происходит путем попадания органических и неорганических веществ на её поверхность.

Среди наиболее опасных загрязнителей выделяется группа полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), являющихся высокомолекулярными соединениями бензольного ряда, обладающими токсичными и мутагенными свойствами. ПАУ попадают в окружающую среду при сжигании угля и нефтепродуктов, выбросах промышленности, деятельности деревоперерабатывающих фабрик и сжигании различных отходов (Maliszewska-Kordybach, 1999). Они также образуются при пиролизе целлюлозы, вулканической активности и лесных пожарах (Schwab et al., 1998). Из-за многообразия источников ПАУ они широко распространены в природной среде и служат маркерами как естественных, так и антропогенных трансформаций природных сред (Trevors, 2011).

Пруды-шламонакопители и промышленные отстойники представляют собой опасный и стабильный источник загрязнения. Особую тревогу вызывает способность токсичных соединений, накапливающихся в этих объектах, мигрировать в грунтовые воды, создавая долговременные очаги химического загрязнения. Цель работы – изучить накопление полициклических ароматических углеводородов в почвах, подверженных длительному техногенному воздействию территории бывшего шламонакопителя.

Объекты и методы

Объектом исследования являлись почвы импактной зоны поймы реки Северский Донец на территории бывшего шламонакопителя, расположенного в пределах ныне осушенного озера Атаманского. В 50-е годы прошлого века активное промышленное развитие в районе города Каменск-Шахтинский

привело к формированию крупного промышленного центра с химическими предприятиями. Вследствие этого, в долине реки Северский Донец появились пруды-отстойники и шламонакопители, которые использовались до 90-х гг. Аварийные выбросы, а также систематические промышленные сбросы в пойменные озера привели к уничтожению пойменных ландшафтов (Бауэр и др., 2018). В настоящее время такие озера служат вторичным источником загрязнения. Итогом длительного сброса отходов с химических заводов стало поднятие уровня грунтовых вод и как следствие заболачивание почв, что существенно повлияло на миграцию опасных поллютантов (Бауэр и др., 2018).

На территории и вблизи шламонакопителя и вдали от него были заложены порядка 100 площадок мониторинга, 19 из которых представлены в рамках текущего исследования (рис. 1). При выборе площадок мониторинга руководствовались необходимостью равномерного распределения площадок мониторинга по периметру озера, а также разнообразием свойств почв. Площадки расположены по периферии озера, а также на расстоянии 500–1200 м на Северо-Запад и Запад от источника загрязнения. Почв площадок мониторинга № 2 и № 3 являются фоновыми и представлены лугово-черноземной тяжелосуглинистой почвой (Stagnic Chernozems) на аллювиальных отложениях и аллювиальной песчаной почвой (Arenic Fluvisols). Почвы площадок мониторинга территории бывшего шламонакопитяля представляют собой Toxic Technosols.

Свойства почв варьируют в широких пределах от песка до легкой глины, pH – от сильно кислой до слабо щелочной. Содержание обменного кальция от 6,0 смоль(+)/кг до 38,8 смоль(+)/кг, магния – от 0,6 смоль(+)/кг до 5,8 смоль(+)/кг. Наибольшие вариации свойств почв характерны по содержанию карбонатов. Параметр $CaCO_3$ варьирует от 0,1% до 5,3%, CV составляет 113% (таблица 1).

Отбор проб был произведен согласно ГОСТ 17.4.4.02-2017 с каждой мониторинговой площадки на глубину 0–20 см. Первым этапом пробоподготовки являлась механическая очистка от растительных остатков. Извлечение поллютантов из образцов почвы было проведено методом высоко эффективной жидкостной хроматографии согласно ПНД Ф 16.1:2.2:2.3:3.62-09.

Оценку степени загрязнения почв проводили с помощью суммарного показателя загрязнения (Zc) по формуле 1 (Сает и др., 1990):

$$Z_C = \sum K_{Ci} - (n - 1), \quad (1)$$

где K_{Ci} – коэффициент концентрации отдельных соединений, n – число учитываемых элементов и соединений с K_{Ci} >1. Согласно значениям Z_C выделяются следующие категории загрязнения (Касимов и др., 2012): неопасная (<4), допустимая (4–8), малоопасная (8–16), умеренно опасная (16–32), опасная (32–64), очень опасная (64–128) и чрезвычайно опасная (>128). При расчете Zc для почв с супесчаным и песчаным гранулометрическим составом в качестве фоновых значений принимали результаты, полученные для почв площадки мониторинга №2, для суглинков - №3. Для идентификации источников происхождения ПАУ были рассчитаны молекулярные индексы, представленные в таблице 2.

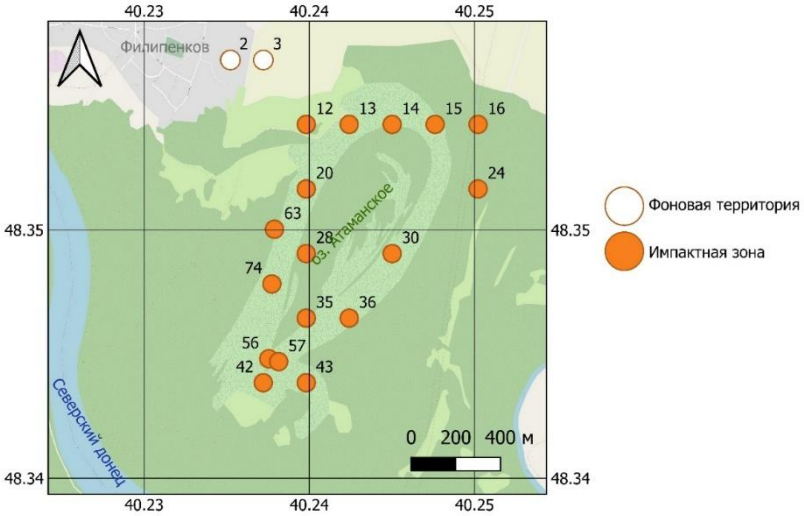

Рисунок 1. Картосхема расположения площадок мониторинга импактной зоны бывшего шламонакопителя

Таблица 1. Физические и химические свойства почв площадок мониторинга

Параметры	pH	$C_{орг}$	$CaCO_3$	Ca^{2+}	Mg^{2+}
		%		смоль(+)/кг	
Среднее	6.3	1.7	1.7	24.7	2.9
Медиана	7.3	1.7	0.3	28.2	3.0
Минимум	3.4	0.9	0.1	6.0	0.6
Максимум	8.1	2.7	5.3	38.8	5.8
Стандартное отклонение	1.7	0.5	1.9	9.6	1.3
Коэффициент вариации, %	27.6	27.7	113.4	38.8	46.5

Примечание: $C_{орг}$ – содержание органического углерода

Таблица 2 – Диагностические соотношения для идентификации источников поступления ПАУ в почвы

Молекулярное соотношение	Диапазон значений	Источники ПАУ
Ант/(Ант+Фен)	<0,10	Петрогенные источники
	>0,10	Горение
Флт/(Флт+Пир)	<0,40	Нефть, фоновый источник
	0,40-0,50	Выбросы при горении нефти или дизеля, легковые автомобили
	>0,50	Горение органических остатков, угля, древесины
БаП/(БаП+БghiП)	<0,60	Нетранспортные источники
	>0,60	Транспортные источники

Примечание: Ант – антрацен, Фен – фенантрен, Флт – флуорантен, Пир – пирен, БаП – бенз(а)пирен, БghiP – бенз(g,h,i)перилен

Результаты и обсуждение

В результате исследования установлено, что суммарное содержание 12 ПАУ составляет 340 нг/н в почвах фоновых участков, расположенных на удалении от шламонакопителя, до 2358–8372 нг/г в почвах импактной зоны бывшего шламонакопителя (рис. 2). Максимальная техногенная нагрузка приходится на почвы площадки мониторинга № 30, где суммарное содержание ПАУ достигает 8710 нг/г и превышает фоновые значения в 25 раз. Следующими по степени загрязнения являются почвы мониторинговой площадке № 57 и № 28, где суммарное содержание полиаренов составляет 8372 нг/г и 8017 нг/г, что выше почв фоновой территории в 24–25 раз. Эти площадки мониторинга находятся непосредственно вблизи очага сброса промышленных стоков. По мере удаления от очага загрязнения суммарное содержание полиаренов снижается. Минимальные концентрации ПАУ обнаружены в почве площадки мониторинга № 12 и № 14 – 2358 нг/г и 4455 нг/г соответственно. В почвах фоновых участков в составе ПАУ доминируют фенантрен, пирен, бенз(g,h,i)перилен, импактной зоны бенз(b)флуорантен, пирен и дибенз(a,h)антрацен (рис. 3). Перечисленные полиарены, за исключением дибенз(a,h)антрацена являются индикаторами техногенеза (Хаустов и Редина, 2016). Повышенной содержание бенз(b)флуорантена также обнаружено в исследовании почв полигонов жидких отходов целлюлозно-бумажного производства города Байкальска (Жаксылыков, 2022). Повышенное содержание бенз(b)флуорантена обусловлено также его высокой стабильностью, в работе Ровинского отмечается, что менее стабильным,

чем бенз(b)флуорантен, но более стабильным, чем бенз(а)пирен, является дибенз(а,h)антрацен (Ровинский и др. 1988).

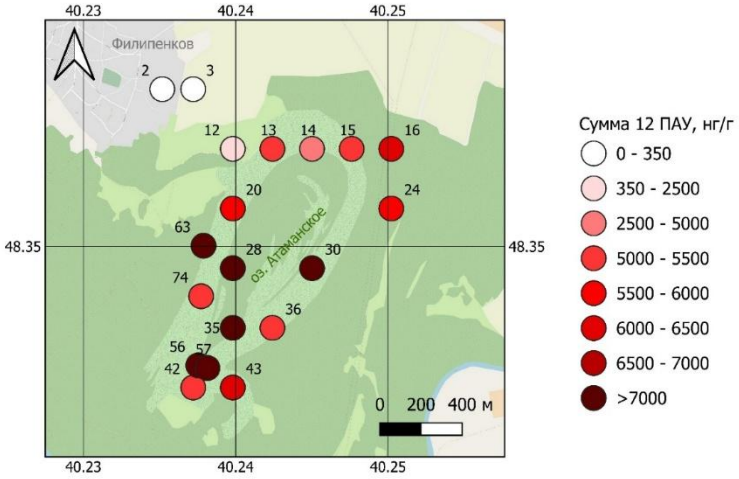

Рисунок 2. Суммарное содержание индивидуальных соединений ПАУ в почвах бывшего шламонакопителя

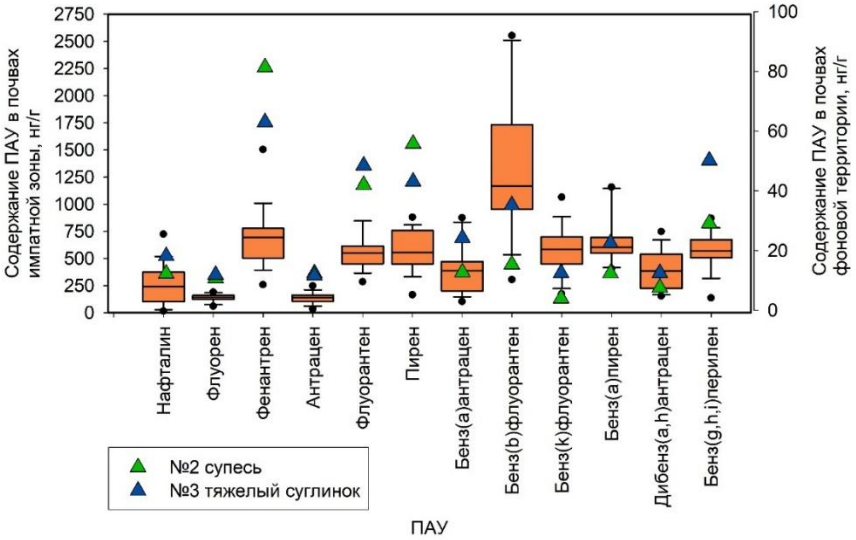

Рисунок 3. Содержание индивидуальных соединений ПАУ в почвах бывшего шламонакопителя

По результатам расчета суммарного показателя загрязнения установлено, что почвы бывшего шламонакопителя относятся к категориям опасных и чрезвычайно опасных, значение Zc варьирует от 94 до 423. При этом по

коэффициенту концентрации наибольший вклад в загрязнение вносят наиболее опасные высокомолекулярные ПАУ, такие как бенз(b)флуорантен, бенз(k)флуорантен, и дибенз(g,h,i)перилен (рис. 4, 5).

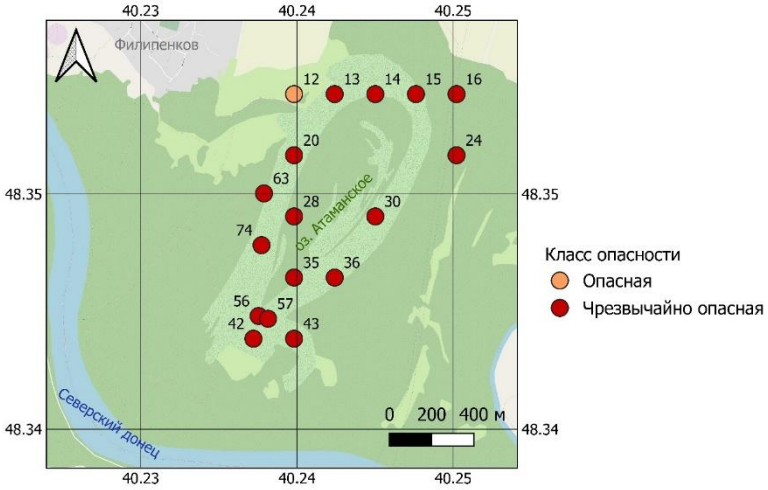

Рисунок 4. Класс опасности почв по результатам расчета суммарного показателя загрязнения

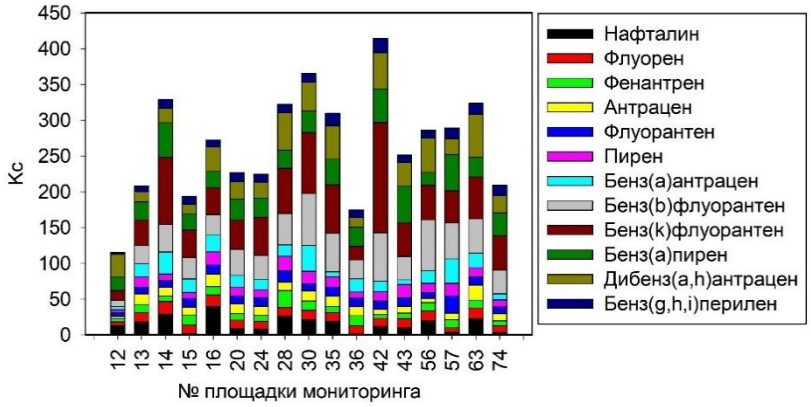

Рисунок 5. Вклад индивидуальных соединений ПАУ в значение суммарного показателя загрязнения по коэффициенту концентрации в почвах бывшего шламонакопителя

Расчет молекулярных соотношений индивидуальных ПАУ показал, что НМ и ВМ полиарены поступают в почву преимущественно из одних и тех же источников. Особенно показательно, что соотношение Ант/(Ант+Фен) превышает пороговое значение 0.1, что является диагностическим критерием для

идентификации пирогенного происхождения ПАУ. Эти выводы полностью согласуются с выявленным доминированием в почвенном загрязнении таких характерных пирогенных маркеров, как бенз(b)флуорантен и дибенз(ah)антрацен. Основными источниками данных соединений являются процессы неполного сгорания органического материала при высоких температурах. Это подтверждается и другими молекулярными соотношениями, такими как отношение 4-кольчатых ПАУ флуорантен/(флуорантен+пирен) демонстрирующими, что ПАУ в исследуемые почвы поступали как в результате горения органических остатков, угля и древесины, так и в результате выбросов нефти. Примечательно, что соотношение бенз(a)пирен/(бенз(a)пирен+бенз(g,h,i)перилен) указывает на преобладание стационарных промышленных источников над транспортными.

Заключение

Таким образом, установлено, что в почвах бывшего шламонакопителя медианное суммарное содержание 12 приоритетных ПАУ соответствует 5520 нг/г, что превышает фоновые значения в 16 раз. В составе индивидуальных соединений доминируют бенз(b)флуорантен, пирен и дибенз(a,h)антрацен. По суммарному показателю загрязнения почвы исследуемой территории относятся преимущественно к категории чрезвычайно опасных, наибольший вклад в загрязнение бенз(b)флуорантен, бенз(k)флуорантен, и дибенз(g,h,i)перилен, происхождение которых связано с промышленными источниками и горением органических остатков.

Благодарности и финансирование

Работа была выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № № 075-15-2025-667 от 06.08.2025, и Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» в Южном федеральном университете.

Список литературы

1. Бауэр Т.В., Линник В.Г., Минкина Т.М., Манджиева С.С., Невидомская Д.Г. Эколого-геохимические исследования техногенных почв в пойменных ландшафтах Северского Донца (бассейн Нижнего Дона) // Геохимия. 2018. № 10. С. 956–966. https://doi.org/10.1134/S0016752518100047

2. Жаксылыков Н.Б., Узор М.А., Кошелева Н.Е. Полициклические ароматические углеводороды в почвах Байкальска // Международ. практ. молодеж. науч. школа. Ростов-на-Дону, 2022. С. 96–102.

3. Касимов Н.С., Кошелева Н.Е., Власов Д.В., Терская Е.В. Геохимия снежного покрова в Восточном округе Москвы // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2012. №. 4. С. 14-24.

4. Ровинский Ф.Я., Теплицкая Т.А., Алексеева Т.А. Фоновый мониторинг полициклических ароматических углеводородов. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 226 с.

5. Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П., Смирнова Р.С., Башкевич И.Л., Онищенко Т.Л., Павлова Л.Н., Трефилова Н.Я., Ачкасов А.И., Саркисян С.Ш. Геохимия окружающей среды. Москва: Недра, 1990. – 335 с.

6. Хаустов А.П., Редина М.М. Индикаторные соотношения концентраций полициклических ароматических углеводородов для геоэкологических исследований природных и техногенных объектов // Геоэкология. Инженерная геоэкология, гидрогеология, геокриология. 2016. Вып. 3. С. 220-233.

7. Maliszewska-Kordybach B. Sources, concentrations, fate and effects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the environment. Part A: PAHs in air // Polish journal of environmental studies. 1999. V. 8. P. 131-136.

8. Schwab A.P., Al-Assi A.A., Banks M.K. Adsorption of naphthalene onto plant roots // Journal of environmental quality. 1998. V. 27. №. 1. P. 220-224.

9. Trevors J. T. Viable but non-culturable (VBNC) bacteria: gene expression in planktonic and biofilm cells // Journal of microbiological methods. 2011. V. 86. №. 2. P. 266-273. https://doi.org/10.1016/j.mimet.2011.04.018

Статья поступила в редакцию 10 февраля 2026 г.
Поступила после доработки 25 февраля 2026 г.
Принята к печати 18 марта 2026 г.
Received 10, February, 2026
Revised 25, February, 2026
Accepted 18, March, 2026