

ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИЕ АРОМАТИЧЕСКИЕ УГЛЕВОДОРОДЫ В ПОЧВАХ БАЙКАЛЬСКА

**Н. Б. Жаксылыков, М. А. Узор,
Н. Е. Кошелева**

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
г. Москва, Россия
niyaz.zh@mail.ru

Введение. Почвы, как важнейший объект мониторинга в городах, выступают маркером многолетнего загрязнения. Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ, полиарены) являются экологически значимыми поллютантами компонентов городских ландшафтов, многие из них токсичны, являются опасными канцерогенами и мутагенами. ПАУ поступают в городскую среду от выбросов, отходов и стоков многих промышленных производств, ТЭЦ, транспорта, при добыче и сжигании угля и нефти. Образуясь при пиролизе органических веществ, эти соединения в своей структуре имеют от 2 до 7 конденсированных бензольных колец. К приоритетным загрязнителям отнесены 16 ПАУ, рекомендованных для мониторинга Агентством по охране окружающей среды США.

Территорией нашего исследования является Байкальск (Иркутская область) – город, расположенный на юго-западном берегу оз. Байкал, объекта всемирного наследия ЮНЕСКО. В период с 1966 по 2008 гг., когда в городе функционировал Байкальский ЦБК (БЦБК), было накоплено 6,2 млн. тонн отходов, которые размещены в картах-накопителях Солзанского (площадью 138 га) и Бабхинского (42 га) полигонов [3]. Возможность миграции отходов БЦБК с геохимическими потоками в сопредельные ландшафты и их аккумуляция в почвах создает потенциальную угрозу для загрязнения вод оз. Байкал.

Природные условия изучаемой территории. Байкальск расположен на подгорной равнине в предгорьях хребта Хамар-Дабан. Количество атмосферных осадков составляет в среднем

859 мм/год, город самый снежный и дождливый на побережье озера Байкал. Самый холодный месяц – январь ($-17,4^{\circ}\text{C}$), теплый – июль ($+15,3^{\circ}\text{C}$). Среднегодовая скорость ветра достигает 2,5 м/с, в течение года преобладают ветры северо-восточного, северного и восточного направлений, дующие с Байкала.

Растительность на территории города представлена пихтовой, кедрово-пихтовой и елово-пихтово-кедровой тайгой. Местами древесный покров в городе разрежен и наряду с почвами испытывает антропогенное воздействие. Наибольшее распространение на территории Байкальска получили горные подбурь [2] с малой мощностью профиля (менее 40 см). В пределах города почвенный покров частично утрачивает свои зональные черты, так как в урбанизированных условиях почвы претерпевают значительные преобразования. В городах повсеместно распространены урбаноземы, профиль которых чаще всего состоит из одного или нескольких урбиковых горизонтов UR. Городские почвы характеризуются большой мощностью (горизонт UR способен достигать более 40 см), бесструктурностью, резкими переходами между горизонтами, наличием различных артефактов (стройматериалов, мусора).

Источники техногенного воздействия. Основными источниками загрязнения в Байкальске являются объекты теплоэнергетики и промышленности (БЦБК), а также автомобильный и железнодорожный транспорт. Город является важным транспортным узлом, через который проходит федеральная автотрасса «Байкал» и Транссибирская железнодорожная магистраль. Загрязнение городских почв обусловлено многолетним воздействием БЦБК, а именно отходами шлам-лигнина и золой ТЭЦ. Отходы целлюлозно-бумажного производства размещены на двух полигонах: Солзанский в юго-восточной части города, состоящий из 10 карт-накопителей, и Бабхинский в юго-западной части города, более удаленный от промышленной площадки БЦБК с 4 картами-накопителями. ТЭЦ города использует в качестве сырья бурые угли Канско-Ачинского бассейна.

Материалы и методы

В основу работы положены результаты почвенно-геохимической съемки на территории г. Байкальска в июле 2019 г. Опробование верхнего (0–10 см) горизонта городских почв выполнено по регулярной сетке с шагом 500–700 м в функциональных зонах города: промышленной, транспортной (автомобильной и железнодорожной подзонах), селитебной низкой и высокой этажности, рекреационной. В качестве природного фона использованы почвы Южного Прибайкалья за пределами города. Всего на территории исследования отобрано 68 образцов почв и 4 пробы отходов производства из карт-накопителей БЦБК и золы ТЭЦ.

Содержание ПАУ в почвенных пробах, шлам-лигнине БЦБК и золе ТЭЦ определялось методом низкотемпературной спектрофлуориметрии Э.В. Шпольского в лаборатории углеродистых веществ биосферы географического факультета МГУ. В работе проанализированы абсолютные содержания 16 полиаренов в фоновых почвах и в почвах отдельных функциональных зон города, в отходах карт-накопителей БЦБК и золе ТЭЦ, рассчитаны суммарные значения для легких (2-3-кольчатых), тяжелых (4-6-кольчатых) и всех ПАУ, определены соотношения низкоядерных соединений к высокоядерным.

Результаты и их обсуждение

ПАУ в фоновых и городских почвах. Горные подбурсы легкосуглинистого состава, выступающие как фоновые почвы, имеют низкие содержания ПАУ в верхнем слое, суммарное содержание полиаренов 7,68 мг/кг (табл. 1). В составе фоновых почв преобладают тяжелые структуры, отношение легких к тяжелым ПАУ 0,029. Среди высокоядерных полиаренов преобладают 4-кольчатый флуорантен (65,5 %) и 5-кольчатый бенз(б)флуорантен (29,0 % от суммы ПАУ), среди низкоядерных – 2-кольчатый нафталин (1,0 %) и его гомологи (0,6 % от суммы ПАУ).

В золе ТЭЦ сумма ПАУ (46 мг/кг) незначительно выше средней концентрации по городу и в составе полиаренов преобладают низкокольчатые структуры, на их долю приходится 73 % от всей суммы ПАУ (табл. 1). В составе золы больше всего гомоло-

Таблица 1 – Среднее содержание ПАУ в верхнем (0–10 см) горизонте фоновых горных подбуров и почв функциональных зон Байкальского, в шлам-лигнине БЦБК и золе ТЭЦ, мг/кг

ПАУ	Фоновые (4*)	Промышленная (21)	Автотранспортная (11)	Транспортная ж/а (10)	Жилая многоэтаж. (6)	Жилая одноэтаж. (12)	Рекреационная (8)	Среднее в городе (68)	Шлам-лигнин БЦБК	Зола ТЭЦ
Гомологи нафталина	0,05	0,6	3,87	1,08	0,75	0,28	0,04	1,03	0,28	15,8
Нафталин	0,08	0,28	3,04	0,08	0,5	0,16	0,02	0,63	0,38	10,9
Аценафтен	0,02	0,04	0,67	0,07	0,24	0,1	0,001	0,16	0	0
Флуорен	0,008	0,02	0,11	0,02	0,02	0,01	0,002	0,03	0,05	0
Фенантрен	0,04	0,53	2,37	0,2	0,62	0,4	0,04	0,67	0	2,65
Антрацен	0,003	0,02	0,04	0,01	0	0,03	0,0005	0,02	0	4,11
Аценафтилен	0,02	0,08	0,45	0,14	0,03	0,03	0,007	0,12	0	0
Сумма легких ПАУ	0,22	1,57	10,6	1,61	2,15	1,02	0,11	2,67	0,7	33,5
Хризен	0,001	0,1	0,99	0,07	0,01	0,32	0,004	0,25	0,8	2,38
Пирен	0,08	0,06	0,36	0,3	0,03	0,13	0,01	0,14	0	0
Бенз(а)антрацен	0,02	0,04	0,23	0,06	0,15	0,04	0,002	0,08	0	0,2
Флуорантен	5,04	52,8	34,1	4,86	3,3	7,09	3,99	23,5	0,19	0,46
Бенз(а)пирен	0,005	0,02	0,06	0,03	0,005	0,05	0,001	0,03	0,01	0,04
Бенз(ghi)перилен	0,03	0,2	0,96	0,23	0,06	0,05	0,003	0,25	0,12	1,08
Дибензантрацен	0,04	0,13	0,5	0,13	0,03	0,07	0,002	0,15	0,09	0,55
Бенз(к)флуорантен	0,02	0,06	0,2	0,05	0,01	0,14	0,007	0,08	0,02	0,23
Бенз(б)флуорантен	2,23	4,54	57	0,54	1,74	5,21	0,29	11,3	5,94	7,53
Сумма тяжелых ПАУ	7,47	57,9	94,4	6,28	5,34	13,1	4,31	35,7	6,46	12,5
Отношение легких к тяжелым ПАУ	0,029	0,027	0,112	0,26	0,402	0,078	0,026	0,075	0,11	2,68
Сумма ПАУ	7,68	59,5	105	7,89	7,48	14,1	4,43	38,4	7,16	45,9

*в скобках – количество проб.

гов нафталина (34,5 %) и нафталина (23,7 %), слабо накапливаются антрацен (9 %) и фенантрен (5,8 % от суммы ПАУ). Среди высококольчатых полиаренов доминируют бенз(б)флуорантен (16,4 %) и хризен (5,2 %). Полученные нами данные согласуются с результатами других исследований, посвященных полиаренам в золе угольных ТЭЦ [1, 4].

В отходах производства из карт-накопителей БЦБК уровень содержания концентрации полиаренов низкий, сумма ПАУ составляет 7,16 мг/кг, что ниже содержания в золе ТЭЦ в 6,4 раза. По сравнению с золой ТЭЦ в шлам-лигнине преобладают высокоядерные структуры (90 %), но доминирует так же бенз(б)флуорантен (83 % от суммы ПАУ). Повышенные содержания имеют флуорантен (3 %) и бенз(ghi)перилен (2 % от суммы ПАУ). Среди легких ПАУ в шлам-лигнине, также как и в золе, доминирует нафталин и его гомологи, доли которых в сумме ПАУ составляют 5 и 4 % соответственно.

Городские почвы в основном супесчаного состава, с высоким содержанием ПАУ, сумма полиаренов в верхнем слое (38,4 мг/кг) выше фоновых значений в 5 раз (табл. 1). Преобладают высокоядерные структуры, отношение легких к тяжелым полиаренам составляет 0,075. Среди тяжелых ПАУ, аналогично фоновым почвам, доминируют флуорантен (61,1 %) и бенз(б)флуорантен (29,4 % от суммы ПАУ). Из низкоядерных структур слабо накапливаются гомологи нафталина и нафталин (2,7 и 1,6 %), а также у 3-кольчатый фенантрен (1,7 % от суммы ПАУ).

Наиболее высокий уровень загрязнения ПАУ в почвах автомобильной подзоны (105 мг/кг), где высокоядерные ПАУ преобладают над низкоядерными структурами. В их составе преобладают тяжелые бенз(б)флуорантен (54,3 %) и флуорантен (32,5 % от суммы ПАУ). Сумма ПАУ в автомобильной подзоне в 13,3 раза превышает концентрации в железнодорожной. В структуре полиаренов железнодорожной подзоны преобладает флуорантен (61,6 % от суммы ПАУ), входящий в состав продуктов сжигания как древесины, так и бензина, что определяет его накопление в городских почвах в результате выбросов БЦБК, выхлопных газов автотранспорта и лесных пожаров. Сжигание автомобиль-

ного топлива способствует накоплению бенз(б)флуорантена в почвах автотранспортной подзоны. Второй по загрязненности является промышленная зона (59,5 мг/кг), где так же доминируют флуорантен (88,7 %) и бенз(б)флуорантен (7,6 % от суммы ПАУ). Уровень загрязнения промышленной зоны обусловлен нахождением вблизи основных техногенных источников города – промышленной площадки БЦБК и ТЭЦ, Солзанского полигона отходов БЦБК с картами-накопителями и золоотвалом. Флуорантеновый тип загрязнения промышленной зоны определен влиянием техногенных объектов – шлам-лигнин наиболее обогащен высокоядерными бенз(б)флуорантеном и флуорантеном, в золе ТЭЦ, несмотря на преобладание в составе легких летучих ПАУ, среди тяжелых преобладает бенз(б)флуорантен. Кроме того, по территории промышленной зоны проходит ответвление железнодорожной магистрали, по которой транспортировалось сырье на предприятие и уголь на ТЭЦ, а также вывозилась готовая продукция. Почвы железнодорожной подзоны наиболее обогащены флуорантеном, что и объясняет его вклад в загрязнение почв промышленной зоны, наряду с автотранспортом.

Таким образом, почвы Байкальска обогащены преимущественно двумя высокоядерными полиаренами – флуорантеном и бенз(б)флуорантеном, что определяет флуорантеновый тип их загрязнения. Данная структура загрязнения обусловлена воздействием специфических техногенных источников – отходов и выбросов БЦБК, автотранспорта. Атмосферный перенос продуктов горения лесов – основной путь поступления легких 2–3 кольчатых ПАУ в городские почвы [5].

Заключение

Исследование содержания полиаренов в почвах г. Байкальска показало, что загрязнение почв формируется в основном за счет высококольчатых структур, среди которых преобладает флуорантен (61 % от суммы ПАУ), что определяет тип загрязнения городских почв как флуорантеновый. Суммарное содержание ПАУ в городских почвах превышают фоновые концентрации в среднем в 5 раз. Повышенный фон полиаренов вблизи города,

связанный с влиянием выбросов БЦБК и лесных пожаров, определяет такую невысокую контрастность в уровнях накопления ПАУ между городскими и фоновыми почвами. Концентрации легких ПАУ в почвах Байкальска превышают фоновые в среднем в 12 раз, тяжелые ПАУ – в 5 раз. Самые высокие уровни загрязнения выявлены в почвах промышленной зоны и автомобильной транспортной подзоны. Источниками ПАУ в Байкальске являются выбросы и отходы БЦБК и Байкальской ТЭЦ, а также авто- и железнодорожного транспорта. В золе ТЭЦ наибольшие уровни концентрации у низкокольчатых нафталина и его гомологов (24 и 34 % соответственно), антрацена (9 %), фенантрена (6 %) и у высококольчатого бенз(б)флуорантена (16 % от суммы ПАУ). В шлам-лигнине преобладает бенз(б)флуорантен (83 % от суммы ПАУ), что определяет тип загрязнения почв отходами производства БЦБК как бенз(б)флуорантеновый. Нафталин и его гомологи доминируют в шлам-лигнине по сравнению с другими легкими полиаренами (5 и 4 % от суммы ПАУ соответственно).

Работа выполнена при поддержке РФФИ-РГО (проект № 17-2905055\17 офи_м).

Литература

1. Габов Д. Н., Яковлева Е. В., Василевич М. И., Василевич Р. С. Накопление полициклических ароматических углеводородов в снежном покрове вблизи предприятий топливно-энергетического комплекса вокруг г. Воркута // Геоэкология. 2019. № 1. С. 24–37.
2. Почвенная карта РСФСР, масштаб 2500000. М.: ГУГК, 1988.
3. Родькина И. А., Самарин Е. Н., Зеркаль О. В., Чернов М. С., Кравченко Н. С. Нейтрализация влияния Байкальского ЦБК на окружающую среду. Часть 1 // Твердые бытовые отходы. 2021. № 3. С. 49–52.
4. Хомич В. С., Рыжиков В. А., Курман П. В. Золоотвалы ТЭЦ как источники загрязнения почв полициклическими ароматическими углеводородами // Природопользование. 2014. № 26. С. 44–53.
5. Цибарт А. С., Геннадиев А. Н. Полициклические ароматические углеводороды в почвах: источники, поведение, индикационное значение (обзор) // Почвоведение. 2013. № 7. С. 788–802.