ЭКОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 581.5:631.4

DOI: <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2021-3-240-250>

Мониторинг и оценка влияния бенз(а)пирена на хвойные и лиственные растения в зонах антропогенного загрязнения

Лариса Ивановна Белых¹✉, Наталия Юрьевна Полей²*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*¹belariv2000@yandex.ru²natali_poley@mail.ru

Аннотация. Проведен мониторинг содержания бенз(а)пирена в растениях и почвах на территории антропогенного загрязнения в зоне выбросов алюминиевого производства. Рассмотрено влияние и дана оценка биологической активности бенз(а)пирена для хвойных и лиственных растений. Показано, что в древесине стволов сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и березы повислой (*Betula pendula*) содержание лигнина, целлюлозы и экстрактивных низкомолекулярных полярных веществ определялись концентрацией бенз(а)пирена и видом дерева. В лесных экосистемах фоновое содержание канцерогена в древесине деревьев (1–5 мкг/кг) не влияло на содержание лигнина и целлюлозы, но стимулировало синтез экстрактивных веществ, особенно у березы. Для сосны отмечена прямая корреляция между концентрацией бенз(а)пирена в двухлетней хвое и ее пероксидазной активностью. Повышение активности оксидоредуктаз и участие их в синтезе фенольных, дубильных и других органических (экстрактивных) веществ в зависимости от концентрации бенз(а)пирена указывают на его биостимулирующие свойства для растений. Проанализированы различные физиолого-биохимические реакции у древесных и травянистых растений в зависимости от концентрации (дозы) бенз(а)пирена в составе растений и в почвах, загрязненных в зонах антропогенных выбросов. Отмечены противоположные реакции хвойных и лиственных деревьев на бенз(а)пирен соответственно ингибирование и стимулирование биохимических процессов. На основе собственных и литературных данных выделены природный, средний переходный и техногенный диапазоны концентраций бенз(а)пирена, в ряду которых влияние на растения изменяется от стимулирующих до ингибирующих эффектов.

Ключевые слова: бенз(а)пирен, концентрация, растения, почва, физиолого-биохимические реакции, стимулирование и ингибирование

Для цитирования: Белых Л. И., Полей Н. Ю. Мониторинг и оценка влияния бенз(а)пирена на хвойные и лиственные растения в зонах антропогенного загрязнения // XXI век. Техносферная безопасность. 2021. Т. 6. № 3. С. 240–250. <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2021-3-240-250>.

ECOLOGY

Original article

Monitoring and assessment of the effect of benzo (a) pyrene for coniferous and deciduous plants in anthropogenically polluted areas

Larissa I. Belykh¹✉, Natalia Yu. Poley²*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*¹belariv2000@yandex.ru²natali_poley@mail.ru

Abstract. Benzo (a) pyrene content in plants and soils in anthropogenically polluted areas pollution was monitored. The influence of benzo (a) pyrene on conifers and deciduous plants was assessed. In forests with Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and silver birch (*Betula pendula*) trunks, the content of lignin, cellulose, and

extractive low molecular weight polar substances was determined by the concentration of benzo (a) pyrene and tree species. In forest ecosystems, the background content of carcinogen (1–5 µg / kg) did not affect the content of lignin and cellulose, but stimulated the synthesis of extractive substances, especially in birch. For pine, there was a direct correlation between the concentration of benzo (a) pyrene in two-year-old needles and its peroxidase activity. An increase in the activity of oxidoreductases and their participation in the synthesis of phenolic, tannin and other organic (extractive) substances, depending on the concentration of benzo (a) pyrene, indicate its biostimulating properties. Various physiological and biochemical reactions in woody and herbaceous plants were analyzed depending on the concentration (dose) of benzo (a) pyrene in the composition of plants and in soils polluted by anthropogenic emissions. Opposite reactions of coniferous and leafy trees to benzo (a) pyrene were observed. On the basis of own and published data, the natural, intermediate transitional and technogenic ranges of benzo (a) pyrene concentrations have been identified; among which the effect on plants varies from stimulating to inhibitory.

Keywords: benzo (a) pyrene, concentration, plants, soil, physiological and biochemical reactions, stimulation and inhibition

For citation: Belykh L. I., Poley N. Yu. Monitoring and assessment of the effect of benzo (a) pyrene on conifers and deciduous plants in anthropogenically polluted areas. *XXI vek. Tekhnosferная bezopasnost' = XXI century. Technosphere Safety*. 2021;6(3):240-250. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2021-3-240-250>.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях антропогенного загрязнения биосферы исследования воздействия биологически активных полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) на физиолого-биохимические процессы растений представляются актуальными. В литературе этой проблеме давно уделяется должное внимание [1–6]. Преобладают работы по установлению закономерностей распределения ПАУ, особенно его индикаторного представителя – бенз(а)пирена (Б(а)П), в системе почва – растения с целью удаления опасных канцерогенных компонентов из загрязненных объектов [7–13]. В модельных экспериментах изучается фитоактивность Б(а)П и ПАУ на примере различных растений, концентрации и структуры вещества, субстратов в виде питательных растворов и почвы [14–18]. В природных и антропогенных условиях на растения оказывает воздействие комплекс различных факторов и загрязняющих веществ, среди которых ПАУ не всегда идентифицируются. Полученные результаты характеризуются значительной вариабельностью, неоднозначностью эффектов стимулирования или ингибирования многих физиологических процессов и их показателей у растений.

Поэтому до сих пор не проведена систематизация результатов и не установлены общие закономерности, возможного воздействия на растения ПАУ с учетом такого их абиотического фактора как концентрация.

Цель работы – мониторинг и изучение зависимости фитоактивности Б(а)П от его концентрации в составе древесных и травянистых растений, почвы на территории антропогенного загрязнения.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами исследования, в которых определяли Б(а)П, были древесина стволов деревьев, почвы, травянистые растения. Образцы древесины лесобразующих в Южном Прибайкалье таких видов хвойных и лиственных деревьев как сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) и береза повислая (*Betula pendula*) отбирали с деревьев, близких по высоте и возрасту (диаметр ствола 6–8 см, 1 класс Крафта) в виде смешанных проб в сезон май–сентябрь.

Пункты опробования объектов были на территории Шелеховского района Иркутской области и отличались разной удаленностью от источников выбросов алюминиевого завода. Выбранные участки

характеризовались примерно одинаковыми почвенными и лесотаксационными показателями: серые лесные почвы, лес среднегорный кедрово-сосновый бруснично-зеленомошный. На данных же участках исследовались почвы горизонтов 0–20, 0–30 см. Детальная их характеристика дана в статье [7].

Методы исследования включали химический анализ объектов на содержание Б(а)П. После просушивания и измельчения из исследуемых объектов массой от 1 до 20 гр. извлекали Б(а)П путем ультразвуковой экстракции смесью н-гексан:хлороформ (1:1). Экстракты дополнительно очищали с помощью метода тонкослойной хроматографии на незакрепленном слое оксида алюминия. Количественно Б(а)П определяли методом низкотемпературной люминесценции путем измерения интенсивности квазилинейчатых спектров при температуре кипения жидкого азота на флуоресцентном спектрофотометре «Hitachi 650-10S» (Япония) способом добавок стандартных растворов, приготовленных на основе ГСО 7515-98 (Россия), по аттестованным методикам^{1,2}.

Методики обеспечивали получение результатов измерений массовой концентрации Б(а)П с относительной погрешностью от 50 до 20%, соответственно, в диапазоне измерений концентрации вещества от 0,5 до 2500 мкг/кг объекта при доверительной вероятности $P = 95\%$ и с пределом обнаружения –

0,05 мкг/кг.

В древесине стволов деревьев определяли массовые доли (%) макрокомпонентов – лигнин, целлюлозу, экстрактивные вещества весовым методом с учетом влажности по методикам^{3,*} с абсолютной погрешностью 0,10%. В качестве экстрагента для выделения экстрактивных веществ использовали смесь этанол-бензол.

Математическая обработка результатов исследований включала расчет коэффициентов корреляции (r_{xy}) линейных зависимостей по программе с оценкой табличного уровня значимости (α) по двухстороннему критерию t-Стьюдента.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Бенз(а)пирен в составе растений.

Активность Б(а)П в древесных растениях изучили на примере древесины стволов хвойных и лиственных деревьев соответственно сосны обыкновенной и березы повислой, произрастающих на разном удалении от выбросов алюминиевого завода. Определение в древесине вещества показало тенденцию его накопления с приближением объектов к источнику загрязнения (табл 1).

Для наиболее загрязненных деревьев в центре поперечного разреза стволов визуально наблюдали ложное ядро бурого цвета. Такая патологическая окраска может быть обусловлена реакциями окисления фенольных и других

¹Методика определения массовой концентрации бенз(а)пирена в пробах растительных материалов методом низкотемпературной люминесценции: свидетельство об аттестации № 224.11.04.019/2008. ФГУП «УНИИМ» г. Екатеринбург.

²Методика определения массовой концентрации бенз(а)пирена в пробах почв и донных отложений методом низкотемпературной люминесценции: свидетельство об аттестации

№ 224.03.04.018/2008. ФГУП «УНИИМ» г. Екатеринбург.

³Оболенская А.В., Ельницкая З.П., Леонович А.А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы. М.: Экология, 1991. 320 с.

*анализы выполнены доцентами кафедры промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности ИРНИТУ – канд. биол. наук И. В. Волчатовой и канд. хим. наук Е. А. Хамидуллиной.

Таблица 1. Содержание бенз(а)пирена в почве и древесине стволов деревьев, произрастающих в лесной экосистеме в зоне выбросов алюминиевого завода

Table 1. The content of benzo (a) pyrene in the soil and wood of tree trunks in the forest ecosystem in the emission zone of the aluminum plant

Расстояние от завода, км	Массовая концентрация, мкг/кг		
	почва	древесина ствола	
	(0–20 см)	сосна (Pinus sylvestris L.)	береза (Betula pendula)
30	7,0 ± 3,0	2,7 ± 1,4	1,5 ± 0,8
20	8,0 ± 4,0	1,2 ± 0,6	4,7 ± 2,4
3,5	110 ± 30	1,7 ± 0,9	1,1 ± 0,6
1,5	390 ± 100	5,0 ± 2,5	3,6 ± 1,8

органических соединений активированными оксидоредуктазами. Действительно, была обнаружена положительная корреляция между пероксидазной активностью в двухлетней хвое сосны и содержанием в ней Б(а)П ($r_{xy} = + 0,868$; $\alpha < 0,01$). Следует отметить, что доля Б(а)П в составе ПАУ выбросов алюминиевого завода [19] составляет 1–2% от суммарного. Это предопределяет возможность накопления в древесине других ПАУ, которые также могут активировать ферменты и окисляться.

В зависимости от содержания Б(а)П в древесине были изучены изменения в ней массы таких макрокомпонентов как лигнин, целлюлоза и экстрактивные вещества.

В древесине сосны и березы в диапазоне концентраций 1–5 мкг/кг Б(а)П не оказывал однозначного влияния на содержание лигнина и целлюлозы. Но в модельных экспериментах культивирования на древесине лигнин- и целлюлозоразрушающих грибов проявились слабые тенденции уменьшения (ингибирование) и увеличения (стимулирование) содержания лигнина соответственно у сосны и березы с увеличением концентрации Б(а)П в исходной древесине. Если содержание лигнина в древесине сосны снижалось в образцах из загрязненных районов по сравнению с фоновыми (контрольными) образцами на 1–8% по абсолютной величине, то в древесине березы наблюдалось увели-

чение в среднем на 1–4% (погрешность определения 0,10%).

Наиболее активное действие Б(а)П оказывал на образование у растений экстрактивных веществ, которые представляют собой низкомолекулярные полярные кислые и нейтральные органические соединения типа фенолов, терпенов, дубильных веществ, органических кислот. Эти вещества участвуют в ростовых и защитных функциях растений при ферментативных окислительных процессах, а их синтез стимулируется под действием разных стрессоров, в том числе химических. С накоплением Б(а)П в древесине деревьев изменялась масса экстрактивных веществ, интенсивность и характер образования которых зависели от концентрации канцерогена и вида дерева. В случае сосны массовая доля экстрактивных веществ в древесине имела слабую тенденцию увеличиваться в диапазоне концентраций Б(а)П 1–3 мкг/кг с дальнейшим снижением эффекта, т.е. наличие канцерогена в древесине ингибировало образование экстрактивных веществ. Для березы масса экстрактивных веществ линейно увеличивалась с содержанием Б(а)П в исходной древесине ($r_{xy} = + 0,995$ при $\alpha < 0,01$). Выраженный эффект увеличения образования экстрактивных веществ в древесине березы может быть биохимическим индикатором стрессовой нагрузки на растение, в частности таких стрессоров как Б(а)П.

В целом, по показателям изменения

лигнина, целлюлозы и экстрактивных веществ отмечалась стабильная противоположная закономерность влияния Б(а)П в составе древесины. Это – снижение содержания макрокомпонентов для сосны и увеличение их для березы с накоплением токсиканта в древесине деревьев.

Влияние концентраций Б(а)П в составе древесины на биохимические процессы деревьев могут представлять реакции растений на биологически активные и других ПАУ, всегда сопутствующие своему индикатору. Эффекты стимулирования и ингибирования образования экстрактивных веществ, потери массы при деструкции древесины грибами имели близкие тенденции во всех условиях экспериментов для определенного вида дерева, но разные – для сосны и березы. Такие реакции растений на Б(а)П качественно согласовывались с результатами, полученными для хвойных и лиственных деревьев парковых и лесопарковых зон, подвергаемых разной степени антропогенного влияния – авто-транспортных выбросов в городской среде г. Иркутска [20]. Если для листьев березы и тополя (*Populus* sp.) обнаруживали прирост массы, площади одного листа относительно фоновых объектов,

то для хвой сосны и лиственницы (*Larix sibirica* Ledeb), наоборот, наблюдали уменьшение массы, длины хвой и побегов, количества пар хвоинок на побеге (рисунок).

Величины показателей для хвойных деревьев уменьшались от 1,5 до 4 раз относительно фона и зависели от антропогенной (транспортной) нагрузки.

Бенз(а)пирен в составе почв. Найденные для сосны эффекты ингибирования биохимических процессов в зависимости от концентрации Б(а)П согласовывались с исследованиями деревьев, произрастающими на территориях разной степени техногенной нагрузки. В работе [21] установлены закономерные уменьшения физиолого-биохимических показателей хвой и побегов сосны *Pinus sylvestris* L. по мере приближения к источникам выбросов от алюминиевого завода и, соответственно, увеличения содержания Б(а)П в почве (табл. 2).

Аналогично лиственным деревьям, для травянистых растений в работе [22] показано стимулирование ряда морфологических и биохимических реакций в зависимости от удаленности алюминиевого завода, т.е. от содержания Б(а)П в почве (табл. 3).

Изменение массы листьев и хвои деревьев в парковых и лесопарковых зонах урбоэкосистемы г. Иркутска относительно фона [20]

Variation in the mass of leaves and needles of trees in park and forest-park zones of the urban ecosystem of Irkutsk relative to the background [20]

Таблица 2. Изменение биометрических и биохимических показателей двухлетних хвои и побегов сосны *Pinus sylvestris* L. в районах разной удаленности от алюминиевого завода и соответственно загрязнения почвенного покрова [21]

Table 2. Changes in biometric and biochemical parameters of two-year-old needles and shoots of *Pinus sylvestris* L. pine in areas located from the aluminum plant and soil pollution at different distances [21]

Расстояние от завода, км	Содержание Б(а)П в почве, мкг/кг	Масса одной хвоинки, мг	Поверхность одного побега, см ²	Сухая масса побега, г	Число пар хвои на побеге, шт	Углекислотный газообмен хвои и побегов			
						мг CO ₂ г ⁻¹ · ч ⁻¹ сух. хвоя		мг CO ₂ ч ⁻¹ на побег	
						фотосинтез	дыхание	фотосинтез	дыхание
25	1,8–10	21,8	106,90±2,39	11,90±4,36	237,2±19,8	5,62±1,10	0,73±0,19	66,88	8,68
12	7,5–15	16,8	44,40±12,11	4,70±1,20	140,0±23,4	3,15±1,14	0,82±0,12	14,42	4,36
7	8,0–20	17,2	33,46±5,63	3,88±0,39	112,8±15,7	2,67±1,25	0,92±0,30	10,35	3,57
8	23–30	11,0	39,34±15,28	2,80±0,47	127,1±26,4	2,73±0,43	1,08±0,61	5,95	2,35
3,5	110–500	11,9	22,01±6,84	2,18±0,30	92,0±10,0	2,38±0,40	0,69±0,35	5,19	1,50

Таблица 3. Изменение морфологических и биохимических признаков подорожника *Plantago media* L. в районах разной удаленности от алюминиевого завода [22]

Table 3. Changes in morphological and biochemical characteristics of the plantain *Plantago media* L. in areas located from the aluminum plant at different distances [22]

Содержание		Показатель				
Расстояние от завода, км	Б(а)П в почве (0–20 см), мкг/кг	число листьев	число генеративных побегов	листовая поверхность, см ²	биомасса листа, г	содержание дубильных веществ, %
20	1,8–10	6	1	109	0,65	1,9
7	8,0–20	9	2	115	0,95	7,5
3	100–500	8	3	154	1,25	3,5

Наблюдаемая положительная динамика образования дубильных веществ в травянистых растениях, а также отмеченное выше увеличение в древесине березы экстрактивных веществ, связаны с синтезом фенольных соединений, участвующих в процессе роста растений или выполняющих защитные функции. Найденные зависимости этих эффектов от концентрации в почве или растениях Б(а)П обуславливают его как биологически активное вещество, стимулирующее ростовые реакции растений.

На примере лесных, урбанизированных экосистем с разными интенсивностями техногенного воздействия, в состав которого входит Б(а)П и другие

ПАУ, проявились эффекты стимулирования многих физиолого-биохимических реакций для лиственных деревьев в отличие от хвойных. В последних при значительных концентрациях Б(а)П в почве, атмосфере преобладало ингибирование ряда процессов. Большая чувствительность хвойных деревьев к химическим стрессорам доказана исследованиями их состояния на территориях техногенных воздействий [23–25]. Например, в зоне выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от источников алюминиевых заводов наблюдалось уменьшение прироста хвойных деревьев, усыхание чувствительных видов в результате нарушения комплекса физиологических про-

цессов. Так, на расстоянии 0,5–1,0 км в санитарно-защитной зоне от завода такие виды деревьев как сосна обыкновенная, лиственница и ель сибирские гибли. В то время как для березы повислой, тополя бальзамического, ивы козьей, вяза приземистой, сирени венгерской наблюдали только уменьшение, например, площади листа на 30–55% от контроля. В других исследованиях обнаруживались близкие эффекты изменения показателей хвойных деревьев, подвергающихся ПАУ-содержащими выбросами вредных производств.

Бенз(а)пирен в различных объектах. В растениях, произрастающих на загрязненных территориях вблизи алюминиевых и металлургических заводов, транспортных магистралей и других источников вы-

бросов ПАУ, проявились биологические эффекты, рассмотренные выше. Наличие Б(а)П в системе «атмосфера – почва – растение» влияло на рост и развитие последних, формируя у них физиолого-биохимические, морфологические, генетические и другие реакции, которые выражались в изменении показателей роста, продуктивности, содержания пигментов, вторичных метаболитов, активности ферментов, синтезе фенолов, терпенов, дубильных веществ, нарушения хромосом. Систематизация полученных и литературных данных модельных и натурных исследований по эффектам действия Б(а)П на различные функции растений показала, что характер и интенсивность изменений определяется концентрацией (дозой) вещества (табл. 4).

Таблица 4. Концентрационные эффекты фитоактивности бенз(а)пирена [1–6, 12, 15–18]

Table 4. Concentration effects of benzo (a) pyrene phytoactivity [1–6, 12, 15–18]

Концентрация (доза) Б(а)П, нг/дм ³ (нг/кг)	Растение и способ его обработки	Физиологические эффекты	
		стимулирование	ингибирование
100–10 000 (в модельном растворе)	Побеги сирени в растворе	Повышение пероксидазной (на 137,5%) и полифенолоксидазной (на 31,3%) активности	–
1000–3000 (в древесине)	Сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i>)	Повышение экстрактивных веществ	–
1000–3600 (в древесине)	Береза повислая (<i>Betula pendula</i>)	Повышение экстрактивных веществ	–
1000–5000 (в хвое)	Сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i>)	Повышение пероксидазной активности	–
10000 (модельный раствор)	Клетки культуры (<i>Dioscorea deltoidea</i>)	Увеличение массы до 2 раз от контроля	–
10000–20000 (модельный раствор)	Табак, рожь, редис, коль- раби	Ускорение роста	–
10000–20000 (внесение в почву)	<i>Tradescantia</i> (clon 02)	Рост биомассы корней	Появление гигантских клеток
10000–40000 (внесение в почву)	<i>Tradescantia</i> (clon 02)	–	Угнетение клеточного деления, мутации, морфоаномалии
30000 – 40000 (внесение в почву)	<i>Tradescantia</i> (clon 02)	–	Ингибирование роста биомассы корней
100 000 (в растворе)	Проростки ели (<i>Picea abies</i>)	–	Уменьшение длины гипокотиле и корня на 30–50%
500 000–50 000 000 (в растворе)	Семядольные хвоинки сосны (<i>Picea abies</i>)	–	Снижение интенсивности фотосинтеза
10 000 000 (в растворе с ДМСО)	Корни лука (<i>Allium cepa</i>)	–	Ингибирование митотической активности, структурное и гистологические изменения корней

По эффектам воздействия Б(а)П на растения условно можно выделить три диапазона его концентраций.

Первый – *природный (физиологический)* диапазон с концентрациями вещества 0,1–200 нг/дм³, которые стимулируют рост растений, синтез полярных низкомолекулярных органических веществ, белков, липидов, активность оксидоредуктаз. Эти растворимые в воде концентрации Б(а)П соответствуют природным и могут стимулировать метаболические и физиологические реакции, не вызывающие у растений отклонений от нормы.

Второй – *средний – переходный* диапазон соответствует концентрациям Б(а)П 200–20000 нг/дм³, при которых активация метаболических процессов сменяется стабилизацией и даже ингибированием многих реакций. Эти концентрации близки к растворимым в воде, природным и предельно допустимым концентрациям (ПДК) Б(а)П в почве с проявлением широкого диапазона реакций от стимулирующих до ингибирующих.

Третий – *антропогенный (техногенный) ингибирующий* или угнетающий диапазон высоких концентраций Б(а)П 10000–50000000 нг/дм³, которые превышают растворимые в воде и ПДК в почве, характеризуются предельными накоплениями вещества в растении, ингибированием многих процессов роста, синтеза, фотосинтеза, генетическим и клеточным изменениям вплоть до угнетения и гибели растений.

Стимулирование интенсивности физиолого-биохимических процессов при низких концентрациях Б(а)П в почве и растениях могут быть природными метаболическими или защитными реакциями растений на воздействия биофильных или техногенных ПАУ. С увеличением их концентрации процессы фотосинтеза, дыхания, активности ферментов замедляются, изменяется состав пиг-

ментов, углеводов, белков, аминокислот, тормозится синтез АТФ, разрушаются цитоплазматические мембраны с повреждением листьев и хвои (хлороз, некроз) и преждевременной дефолиацией. Наблюдаются снижения фотосинтеза, соотношения хлорофиллов «а» и «б», уменьшения содержания углеводов, активности многих ферментов. Воздействуя на функциональные системы растений, ПАУ изменяют ростовые процессы, продуктивность, которые зависят от дозы вещества. При высоких концентрациях ПАУ в объектах среды нарушается метаболизм в растениях, стимулируется катаболизм белков, уменьшается содержание аминокислот, что приводит к необратимым изменениям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Влияние повышенных содержаний Б(а)П в составе древесины на ее деструкцию в модельных экспериментах по показателям содержания лигнина, целлюлозы, потери массы древесины и образованию экстрактивных веществ имело различные эффекты: ингибирование – для сосны и стимулирование – для березы. Аналогичные действия Б(а)П на хвойные и листовенные деревья наблюдали по разным биохимическим и морфофизиологическим показателям как в модельных, так и в натурных исследованиях. На загрязненных почвах для хвои и побегов сосны отмечались уменьшение их числа и массы, площади поверхности, скорости фотосинтеза и его продуктивности. В хвойных деревьях сосны, лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb) эффекты стимулирования при фоновых природных концентрациях Б(а)П (1–3 мкг/кг) сменялись на реакции ингибирования указанных процессов и показателей, особенно в техногенных средах. Для листовенных деревьев березы, тополя (*Populus sp.*) и трав (подорожник *Plantago media* L.) с накоплением Б(а)П в растении или в почве преобладали стимулирование синтеза низкомолеку-

лярных веществ, увеличения числа и массы, площади листьев растений.

Систематизация полученных и литературных данных модельных и натурных исследований по фитоактивности Б(а)П на различные показатели древесных и травянистых растений выявила, что характер и интенсивность изменений зависят от концентрации (дозы) вещества. По эффектам воздействия Б(а)П на рас-

тения выделены три диапазона концентраций, которые варьируют в зависимости от условий внешней среды, сопутствующих компонентов, вида и органа растения:

- природный (физиологический) стимулирующий;
- переходный;
- антропогенный (техногенный) ингибирующий.

Список источников

1. Слепян Э. И. Растения и химические канцерогены. Л.: Наука, 1979. 208 с.
2. Ильницкий А. П. Экологические аспекты циркуляции полициклических ароматических углеводородов // Экология и рак. Киев: Наук. думка, 1985. С. 64–96.
3. Ровинский Ф. Я., Теплицкая Т. А., Алексеева Т. А. Фоновый мониторинг полициклических ароматических углеводородов. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 224 с.
4. Simonich S. L., Hites R. A. Organic pollutant accumulation in vegetation // Environ. Sci. and Technology. 1995. Vol. 29, no. 12. P. 2905–2914.
5. Черненко Т. В. Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение. М.: Наука, 2002. 191 с.
6. Квеситадзе Г. И., Хатисашвили Г. А., Садунишвили Т. А., Евстигнеева З. Г. Метаболизм антропогенных токсикантов в высших растениях. М.: Наука, 2005. 199 с.
7. Белых Л. И., Рябчикова И. А., Серышев В. А. Закономерности распределения бенз(а)пирена в системе почва–растение // Агрохимия. 2005. № 1. С. 60–71.
8. Huang X. D., El-Alawi Y., Penrose D. M., Glick B. R., Greenberg B. M. A multi-process phytoremediation system for removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from contaminated soils // Environmental Pollution. 2004. Vol. 130. P. 465–476.
9. Gao Y. Z., Zhu L. Z. Phytoremediation for phenanthrene and pyrene contaminated soil // Journal of Environmental Sciences. 2005. Vol. 17, no. 1. P. 14–18.
10. Xu S. Y., Chen Y. X., Wu W. X., Wang K. X., Lin Q., Liang X. Q. Enhanced dissipation of phenanthrene and pyrene in spiked soils by combined plants cultivation // Science of the Total Environment. 2006. Vol. 369. Iss. 1–3. P. 206–215.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.05.030>
11. Meudec A., Dussauze J., Deslandes E., Poupart N. Evidence for bioaccumulation of PAHs within internal shoot tissues by a halophytic plant artificially exposed to petroleum-polluted sediments // Chemosphere. 2006. Vol. 65. P. 73–79.
12. Кайбияйнен Л. К., Сафронова Г. И., Болондинский В. К. Влияние токсичных поллютантов на дыхание хвои и побегов сосны обыкновенной // Экология. 1998. № 1. С. 23–27.
13. Яковлева Е. В., Безносилов В. А., Кондратенко Б. М., Габова Д. Н. Биоаккумуляция полициклических ароматических углеводородов в системе почва–растение // Агрохимия. 2008. № 9. С. 66–74.
14. Яковлева Е. В., Безносилов В. А., Кондратенко Б. М., Габова Д. Н. Закономерности биоаккумуляции полициклических ароматических углеводородов в системе почва–растения биоценозов северной тайги // Почвоведение. 2012. № 3. С. 356–367.
15. Яковлева Е. В., Безносилов В. А., Кондратенко Б. М., Хомиченко А. А. Генотоксические эффекты в растениях *Tradescantia (clon 02)* индуцированные бенз[а]пиреном // Сибирский экологический журнал. 2011. Т. 18. № 6. С. 805–812.
16. Kreslavski V. D., Lankin A. V., Vasilyeva G. K., Luybimov V. Yu., Semenova G. N., Schmitt F. J., Friedrich T., Allakhverdiev S. I. Effects of polyaromatic hydrocarbons on photosystem II activity in pea leaves // Plant Physiol. Biochem. 2014. Vol. 81. P. 135–142.
17. Ланкин А. В., Креславский В. Д., Худякова А. Ю., Жармухамедов С. К., Аллахвердиев С. И. Влияние нафталина на фотохимическую активность фотосистемы // Биохимия. 2014. Т. 79. Вып. 11. С. 1493–1504.
18. Яковлева Е. В., Габова Д. Н., Безносилов В. А., Кондратенко Б. М. Влияние бенз(а)пиренового загрязнения на ростовые процессы и состав полиаренов растений // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 4. С. 45–51.
19. Белых Л. И., Малых Ю. М., Пензина Э. Э., Смагунова А. Н. Источники загрязнения атмосферы полициклическими ароматическими углеводородами в промышленном Прибайкалье // Оптика атмосферы и океана. 2002. Т. 15. № 10. С. 944–948.
20. Шергина О. В., Михайлова Т. А. Состояние

древесных растений и почвенного покрова парковых и лесопарковых зон г. Иркутска. Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2007. 200 с.

21. Щербатюк А. С., Русакова Л. В., Янькова Л. С. Состояние пигментного комплекса растений при техногенном загрязнении среды // Оценка состояния водных и наземных экологических систем. Экологические проблемы Прибайкалья. Новосибирск: Наука, 1994. С. 131–135.

22. Вайцеховская Е. Р. Антропогенное воздействие на некоторые виды лекарственных растений Прибайкалья // Оценка состояния водных и наземных экологических систем. Экологические проблемы Прибайкалья: сб. ст. Новосибирск: Наука, 1994. С. 135–139.

23. Воронин В. И., Осколков В. А. Состояние ле-

совозобновления в сосновых лесах Верхнего Приангарья // Оценка состояния водных и наземных экологических систем: Экологические проблемы Прибайкалья: сб. ст. Новосибирск: Наука, 1994. С. 115–122.

24. Михайлова Т. А., Кочмарская Н. С., Анциферова Л. В., Плешанов А. С. Воздействие промышленных эмиссий на хвойные леса Приангарья // Оценка состояния водных и наземных экологических систем. Экологические проблемы Прибайкалья: сб. ст. Новосибирск: Наука, 1994. С. 127–131.

25. Кайбияйнен Л. К., Сафронова Г. И., Болондинский В. К. Влияние токсичных поллютантов на дыхание хвои и побегов сосны обыкновенной // Экология. 1998. № 1. С. 23–27.

References

1. Slepian E. I. Plants and chemical carcinogens. Leningrad: Nauka; 1979. 208 p. (In Russ.).
2. Ilitskiy A. P. Ecological aspects of polycyclic aromatic hydrocarbons circulation. Ecology and cancer. Kiev: Naukova dumka; 1985. p. 64–96. (In Russ.).
3. Rovinsky F. Ya., Teplitskaya T. A., Alekseeva T. A. Background monitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons. Leningrad: Hydrometeoizdat; 1988. 224 p. (In Russ.).
4. Simonich S. L., Hites R. A. Organic pollutant accumulation in vegetation. *Environ. Sci. and Technology*. 1995;29(12):2905–2914.
5. Chernenkova T. V. The reaction of forest vegetation to industrial pollution. Moscow: Nauka; 2002. 191 p. (In Russ.).
6. Kvesitadze G. I., Khatisashvili G. A., Sadunishvili T. A., Evstigneeva Z. G. Metabolism of anthropogenic toxicants in higher plants. Moscow: Nauka; 2005. 199 p. (In Russ.).
7. Belykh L. I., Ryabchikova I. A., Seryshev V. A. Regularities of the distribution of benz (a)pyrene in the soil-plant system. *Agrohimia*. 2005;1:60-71. (In Russ.).
8. Huang X. D., El-Alawi Y., Penrose D. M., Glick B. R., Greenberg B. M. A multi-process phytoremediation system for removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from contaminated soils. *Environmental Pollution*. 2004;130:465-476.
9. Gao Y. Z., Zhu L. Z. Phytoremediation for phenanthrene and pyrene contaminated soil. *Journal of Environmental Sciences*. 2005;17(1):14-18.
10. Xu SY, Chen YX, Wu WX, Wang KX, Lin Q, Liang XQ. Enhanced dissipation of phenanthrene and pyrene in spiked soils by combined plants cultivation. *Science of the Total Environment*. 2006;369:206-215.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.05.030>
11. Meudec A., Dussauze J., Deslandes E., Poupart N. Evidence for bioaccumulation of PAHs within internal shoot tissues by a halophytic plant artificially exposed to petroleum-polluted sediments. *Chemosphere*. 2006;65:73-79.
12. Kaibiyainen L. K., Safronova G. I., Bolondinsky V. K. The effect of toxic pollutants on the respiration of needles and shoots of scots pine. *Ekologia*. 1998;1:23-27. (In Russ.).
13. Yakovleva E. V., Beznosikov V. A., Kondratenok B. M., Gabov D. N. Bioaccumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the soil-plant system. *Agrohimia*. 2008;9:66-74. (In Russ.).
14. Yakovleva E. V., Beznosikov V. A., Kondratenok B. M., Gabov D. N. Regularities of bioaccumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the soil-plants system of biocenoses of the northern taiga. *Pochvovedenie*. 2012;3:356-367. (In Russ.).
15. Yakovleva E. V., Beznosikov V. A., Kondratenok B. M., Khomichenko A. A. Genotoxic effects in *Tradescantia (clon 02)* plants induced by benz [a]pyrene. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*. 2011;18(6):805-812. (In Russ.).
16. Kreslavski V. D., Lankin A. V., Vasilyeva G. K., Luybimov V. Yu., Semenova G. N., Schmitt F. J., Friedrich T., Allakhverdiev S. I. Effects of polycyclic aromatic hydrocarbons on photosystem II activity in pea leaves. *Plant Physiol. Biochem*. 2014;81:135-142.
17. Lankin A. V., Kreslavski V. D., Khudyakova A. Yu., Zharmukhamedov S. K., Allakhverdiev S. I. Effect of naphthalene on photosystem 2 photochemical activity of pea plants. *Biokhimiya*. 2014;79(11):1493-1504. (In Russ.).
18. Yakovleva E. V., Gabov D. N., Beznosikov V. A., Kondratenok B. M. Influence of benz(a)pyrene pollution on growth processes and the composition of polyarenes of plants. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya = Theoretical and applied ecology*. 2015;4:45-51. (In Russ.).
19. Belykh L. I., Malykh Yu. M., Penzina E. E.,

Smagunova A. N. Sources of atmospheric pollution with polycyclic aromatic hydrocarbons in the industrial Baikal Region. *Atmospheric and oceanic optics*. 2002;15(10):944-948. (In Russ.).

20. Shergina O. V., Mikhailova T. A. The state of woody plants and soil cover of park and forest-park zones of Irkutsk. Irkutsk: Institute of Geography SB RAS; 2007. 200 p. (In Russ.).

21. Shcherbatyuk A. S., Rusakova L. V., Yankova L. S. The state of the plant pigment complex under technogenic environmental pollution. Assessment of the state of aquatic and terrestrial ecological systems: Environmental problems of the Baikal region. Novosibirsk: Nauka; 1994. p. 131-135. (In Russ.).

22. Vaitsekhovskaya E. R. Anthropogenic impact on some types of medicinal plants of the Baikal region. Assessment of the state of aquatic and terrestrial ecological systems: Environmental problems of the

Baikal region. Novosibirsk: Nauka; 1994. p. 135-139. (In Russ.).

23. Voronin V. I., Oskolkov V. A. The state of reforestation in the pine forests of the Upper Angara region. Assessment of the state of aquatic and terrestrial ecological systems: Environmental problems of the Baikal region. Novosibirsk: Nauka; 1994. p. 115-122. (In Russ.).

24. Mikhailova T. A., Kochmarskaya N. S., Antsiferova L. V., Pleshanov A. S. The impact of industrial emissions on coniferous forests of the Angara region. Assessment of the state of aquatic and terrestrial ecological systems: Environmental problems of the Baikal region. Novosibirsk: Nauka; 1994. p. 127-131. (In Russ.).

25. Kaibiyainen L. K., Safronova G. I., Bolondinsky V.K. The effect of toxic pollutants on the respiration of needles and shoots of scots pine. *Ekologia*. 1998;1:23-27. (In Russ.).

Информация об авторах

Л. И. Белых,

доктор химических наук,
кафедра промышленной экологии
и безопасности жизнедеятельности,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2990-0059>

Н. Ю. Полей,

магистр,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 07.04.2021.
Одобрена после рецензирования 28.07.2021.
Принята к публикации 31.08.2021.*

Information about the authors

Larissa I. Belykh,

Doctor of Sci. (Chemistry),
Department of Industrial Ecology
and life safety,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., 664074 Irkutsk, Russia,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2990-0059>

Natalia Yu. Poley,

Master's degree student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., 664074 Irkutsk, Russia

Contribution of the author's

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

*All authors have read and approved the final
manuscript.*

*The article was submitted 07.04.2021.
Approved after reviewing 28.07.2021.
Accepted for publication 31.08.2021.*