

Влияние растительного покрова и содержания органического вещества на накопление хлорорганических соединений в почвах

© 2018. Е. А. Мамонтова, к. м. н., с. н. с., Е. Н. Тарасова, к. х. н., с. н. с.,
А. А. Мамонтов, к. б. н., с. н. с., Е. В. Иванов, м. н. с.,
Институт геохимии им. А. П. Виноградова Сибирского отделения РАН,
664033, Россия, Иркутск, ул. Фаворского, 1А,
e-mail: elenam@igc.irk.ru

Исследование стойких органических загрязнителей (СОЗ) в почвах разных типов и в разных фитоценозах, находящихся на небольшой фоновой территории на острове Ольхон, позволило оценить влияние содержания органического вещества и его элементного состава на накопление токсикантов в почвах. Содержание практически всех индивидуальных соединений и их групп достоверно ($p < 0,05$) зависит от уровня $C_{\text{орг}}$, $N_{\text{орг}}$ и $P_{\text{орг}}$ как в почвах открытых пространств, так и в почвах лесных территорий. Показано, что леса служат лучшими адсорбентами СОЗ из атмосферного воздуха по сравнению с растительностью открытых пространств, а лесная почва является лучшим накопителем СОЗ по сравнению с почвами открытых пространств. Наибольшие концентрации найдены в сосновом и лиственничном лесу, наименьшие – в песке дюн Нурганского песчаного массива и почвах степи. Отмечена разница в качественном составе СОЗ в почвах. Содержание СОЗ в почвах открытых пространств (дюн, степей, лугов) обусловлено осаждением поллютантов из атмосферного воздуха (как прямым сухим газообразным или сухим с аэрозольными частицами, так и влажным с дождём или снегом). На лесных территориях накопление СОЗ в большей степени опосредовано влиянием древесной растительности. Различие в накоплении СОЗ в почвах лесных, луговых и степных экосистем оказывает влияние и на уровень риска для здоровья населения.

Ключевые слова: хлорорганические соединения, почва, органическое вещество, растительность.

The influence of vegetation cover and the content of organic matter on the accumulation of organochlorine compounds in soils

Е. А. Mamontova, E. N. Tarasova, A. A. Mamontov, E. V. Ivanov,
A. P. Vinogradov Institute of Geochemistry Siberian Branch of RAS,
1A, Favorskiy St., Irkutsk, Russia, 664033,
e-mail: elenam@igc.irk.ru

The investigation of persistent organic pollutants (POPs) in soil of different types and in different phytocenoses located on small background area on the Island of Olkhon on Lake Baikal allow assessing the influence of soil organic matter content and its elemental composition on the accumulation of toxicants in soil. The content of about all individual polychlorinated biphenyls (PCBs) and organochlorine pesticides (OCPs) and its groups depends on levels of C_{org} , N_{org} and P_{org} in soil of open land and forest land ($p < 0.05$). It is found that forests are better adsorbents of POPs from air in comparison with vegetation of open land. The forest soil is better accumulator of POPs in comparison of open land soil. The highest POPs levels were found in soil of pine forest and larch forest. The lowest POPs levels were found in sand of dunes of Nurganskiy sandy massif and steppe soil. The difference of quality composition of POPs in soil was also found. The ratio of (DDD+DDE)/DDT below 1 was found in forest soils, while the index in steppe and meadow soils is higher than 1, in sand dunes it varied from 0.76 to 2.4. The relative homological pattern of PCBs is also different. The proportion of tetrachlorobiphenyls is higher in sand of dunes, meadow and steppe soils than it in forest soils. The proportion of hexachlorobiphenyls is vice versa higher in forest soil than in soil of open lands. The direct dry gaseous deposition, dry particulate and wet (with rain and snow) deposition of POPs from air influence primary on content of toxicants in soil of open land (dunes, steppe, grassland). The forest vegetation is the primary factor influencing on accumulation of POPs in forest land. The difference in accumulation of POPs in soil of forest and open land make effect on human health risk levels.

Keywords: organochlorine compounds, organic matter, plant canopy.

Стойкие органические загрязнители (СОЗ) – это группа опасных токсичных соединений, проблема загрязнения окружающей среды которыми является одной из основных в настоящее время наряду с проблемами радиоактивного загрязнения, изменения климата и др. В группу СОЗ входят целевые продукты промышленного производства – хлорорганические пестициды (ХОП), в т. ч. дихлордифенилтрихлорэтан (ДДТ) и его метаболиты, гексахлорциклогексан (ГХЦГ), гексахлорбензол (ГХБ), полихлорированные бифенилы (ПХБ) и др., а также побочные продукты промышленного производства – полихлорированные дибензо-пара-диоксины и дибензофураны (ПХДД/Ф). Данные соединения подпадают под действие Стокгольмской, Роттердамской и Базельской конвенций (<http://www.pops.int/>). Они токсичны, способны накапливаться по пищевым цепям и сохраняться в объектах окружающей среды длительное время [1, 2]. СОЗ вызывают отдалённые эффекты, включая онкологические заболевания, нарушения развития, а также эндокринные, репродуктивные, иммунологические расстройства и др. В результате трансграничного атмосферного переноса СОЗ поступают в удалённые от источников районы мира и становятся, таким об-

разом, проблемой как промышленно развитых стран, так и на фоновых территориях [1, 3]. В почвы СОЗ поступают путём сухого и мокрого осаждения, а также с опадом растений [4]. Взаимосвязь распределения СОЗ и органического вещества (ОВ) почв была показана в исследовании фоновых почв в глобальном и региональном масштабах [3, 5]. При этом коэффициент корреляции 0,38–0,42 соответствовал средней силе связи, что связано с влиянием других факторов, таких, как локальные эмиссии, разные скорости процессов распада и накопления СОЗ в почвах, вызванные климатическими и географическими различиями в местах отбора [3].

Цель данного исследования – изучить особенности распределения ХОП и ПХБ в почвах в зависимости от типа растительности и содержания органического вещества (ОВ) в пределах ограниченной территории, чтобы минимизировать влияние указанных выше факторов.

Объекты и методы исследования

Для исследований выбран о. Ольхон (рис. 1), где основным источником поступления СОЗ является атмосферный перенос [6, 7]. Остров

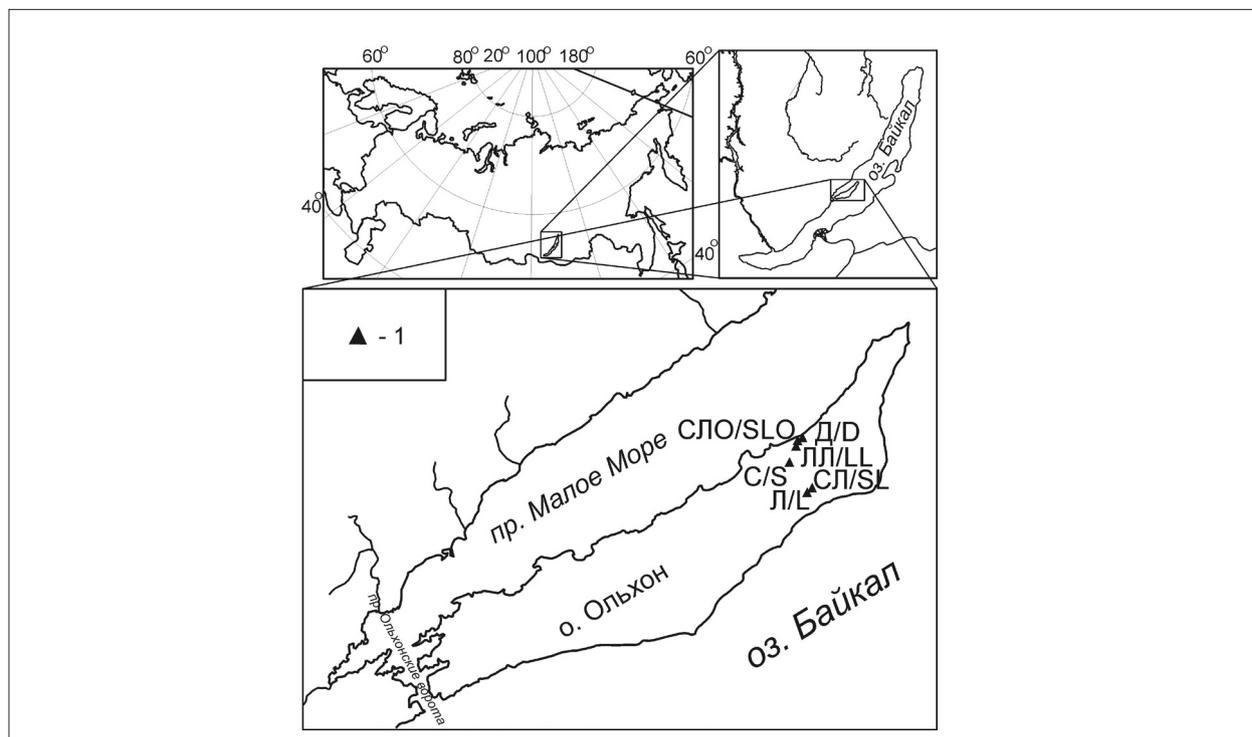


Рис. 1. Карта-схема района исследования: 1 – место отбора проб, Д – Нурганский песчаный массив (дюны) и СЛО – Нурганский песчаный массив (сосновый лес на останцах), ЛЛ – лиственничный лес, Л – луг в сосновом лесу, С – степь и СЛ – сосновый лес / **Fig. 1.** The schematic map of the investigation area: 1 – site of sampling, D – Nurgan sandy massif (dune), SLO – Nurgan sandy massif (pine forest on outliers), LL – larch forest, SL – pine forest, L – meadow, S – steppe

Таблица 1 / Table 1

Описание мест отбора проб / The description of sites of sampling

Название мест отбора Title of site of sampling		Координаты средней точки Coordinates of median site	Комплекс растительности Complex of vegetation	Цвет почвы Color of soil [13]	Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³
Нюрганский песчаный массив (песок) Nurgan sandy massif (sand)	Д/Д	53°16'52,7'' 107°34'40,0''	Псаммофитный (на дюнах) Psammophyte (on the dunes)	10YR 7/4	<u>1,74</u> 1,72–1,76
Нюрганский песчаный массив (сосновый лес на останцах) Nurgan sandy massif (pine forest on outliers)	СЛО/ SLO	53°16'55,6'' 107°34'39,7''	Псаммофитный (на останцах) Psammophyte (on the remnants)	10YR 6/3 10YR 2/2	<u>1,17</u> 0,91–1,38
Лиственничный лес Larch forest	ЛЛ/ LL	53°16'37,7'' 107°34'04,9''	Лесной Forest	10YR 2/1	<u>0,41</u> 0,30–0,52
Сосновый лес Pine forest	СЛ/ SL	53°13'15,88'' 107°35'33,47''	Таёжный светлохвойный Taiga light coniferous	10YR 1.7/1	0,46
Луг Meadow	Л/Л	53°13'13,7'' 107°35'25,7''	Луговой Meadow	10YR 2/2	<u>0,53</u> 0,51–0,56
Степь Steppe	С/С	53°15'12,1'' 107°33'36,6''	Степной Steppe	10YR 3/4	<u>1,21</u> 1,20–1,22

Ольхон, самый крупный остров озера Байкал, отделён от западного побережья Байкала проливами Малое Море и Ольхонские ворота. Климат острова семиаридный с умеренно тёплым летом и умеренно суровой малоснежной зимой [8]. Выбор о. Ольхон для исследования также обусловлен разнообразием типов почв и растительных сообществ. На значительных площадях распространены горные дерновые лесные, подзолистые и дерново-подзолистые почвы. В наиболее засушливых местах в юго-западной части и на северной оконечности острова преобладают горно-каштановые глубокопромерзающие почвы. Каштановые почвы соседствуют с дерновыми лесными под остепнёнными лиственничниками [9]. На отдельных участках западного побережья острова сформировались песчаные массивы [10].

Растительность Ольхона представляет собой сложное образование, формирующееся под воздействием рельефа и климата, и состоит из комплексов фитоценозов степного, псаммофитного и лесного типов [10].

Псаммофитные сообщества формируются на современных эоловых образованиях [10], из которых наиболее мощным по развитию дефляционных процессов является Нюрганский песчаный подрайон. Высокие останцы массива покрыты одиночными деревьями или группами деревьев, в основном сосной обыкновенной [10]. Самые высокие подвижные дюны лишены растительности.

На подветренных склонах низких дюн развиваются сообщества и группировки тимьянового и разнотравно-хамеродосового рядов, а также сообщества овсяницевого и осоковые [10].

В западной части острова распространены типичные злаково-тырсовые и типчковые степи в сочетании с лугами, редкими остепнёнными сосняками и развееваемыми песками, в восточной и центральной частях – сосново-лиственничные, лиственничные, сосновые и лиственнично-сосновые остепнённые леса с богатым подлеском из багульника, рододендрона даурского, ольхи и караганы [9].

Отбор проб почв. Пробы почв были отобраны в августе 2015 г. в удалённых от дорог и туристических маршрутов районах острова. Для исследования были выбраны Нюрганский песчаный массив – дюны (Д) и сосновый лес на останцах (СЛО), лиственничный лес (ЛЛ), луг в сосновом лесу (Л), степь (С) и сосновый лес (СЛ) (табл. 1). В первых четырёх районах отобрано по 5 смешанных проб, в степи – 4, в сосновом лесу – 1 смешанная проба. Расстояние между точками отбора составляло 15 м. Каждая смешанная проба составлялась на месте отбора из 5 проб, отобранных методом конверта со стороны квадрата 1 м. При отборе использовали металлический пробоотборник-лопатку. Глубина отбора – 5 см. До анализа пробы хранились при температуре –30 °С.

Анализ проб производился в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН. До анализа пробы почв были высушены при комнатной температуре до постоянного веса. На анализ бралась фракция меньше 2 мм. Пробоподготовка образцов почв включала экстракцию в аппаратах Сокслетта смесью ацетон:гексан (1:1) в течение 8 ч; очистку с использованием геляпроникающей хроматографии (Bio-Beads S-X3) и Al-Si-колонки; упаривание в токе азота до 0,1 мл. В каждой пробе были определены 43 конгенера ПХБ, включая индикаторные ПХБ (№№ ИЮПАК 28, 52, 101, 138, 153, 180), пара, пара'-ДДТ (p,p'-ДДТ, далее ДДТ), пара, пара'-дихлордифенилдихлорэтан (p,p'-ДДД, далее ДДД), пара, пара'-дихлордифенилдихлорэтилен (p,p'-ДДЭ, далее ДДЭ), α-ГХЦГ, γ-ГХЦГ и ГХБ. Анализ производился с использованием газового хроматографа (ГХ) HP 5890 series II GC, совмещённого с детектором электронного захвата (ДЭЗ) и оснащённого капиллярной колонкой DB-5, 0,25 мкм длиной 60 м (J&W Scientific) [6, 11]. Качество анализа проверялось с использованием сертифицированных референтных материалов CRM814 и CRM962.

Содержание органического углерода ($C_{орг}$), органического азота ($N_{орг}$), органического фосфора ($P_{орг}$) в почвах определялось персульфатным окислением, методом Кьельдаля и сжиганием с персульфатом калия [12], соответственно, а цветность – по колористическим таблицам [13].

Расчёты показателей канцерогенных и неканцерогенных рисков (индивидуальный

канцерогенный риск ИКР и индекс опасности) для здоровья человека от воздействия исследованных СОЗ в почвах проводили в соответствии с Руководством по оценке риска здоровья населения [14].

Статистический анализ результатов, включающий **t-тест** и **факторный анализ** данных, выполнен с использованием программы STATISTICA-6.

Результаты и обсуждение

Содержание $C_{орг}$, $N_{орг}$ и $P_{орг}$ в исследованных почвах изменялось в следующих пределах: 0,16–9,44, 0,006–1,022 и 0,004–0,204% соответственно. Наибольшее содержание $C_{орг}$, $N_{орг}$ и $P_{орг}$ найдено в луговых почвах (Л), на втором месте – почвы лиственного леса (ЛЛ), наименьшее содержание $C_{орг}$, $N_{орг}$ и $P_{орг}$ – в песках дюн Нюрганского песчаного массива (Д). Бедность органического вещества (ОВ) почвы азотом наблюдается как в лесных экосистемах (СЛО+ЛЛ+СЛ), так и на открытых пространствах (Д+Л+С). Степень гумификации в обоих случаях невысокая. Минерализация $P_{орг}$ почвы происходит при С:Р меньше 200 [15]. Для исследованных почв соотношение С:Р достаточно высокое, т. е. для исследованного периода в большей степени происходит иммобилизация Р (для Д+Л+С в меньшей степени, чем для СЛО+ЛЛ+СЛ). Высокие величины С:Р в почве свидетельствуют, что между растениями и микроорганизмами возможна конкуренция за фосфор. Р-лимитацию подтверждает значение отношения N:P > 16 в почвах СЛО, ЛЛ, СЛ и Л [16] (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

$C_{орг}$, $N_{орг}$, $P_{орг}$ (%) и их отношения (в атомах) в исследованных пробах
 $C_{орг}$, $N_{орг}$, $P_{орг}$ (%) and its ratios (in atoms) in investigated soils

Место отбора Sit of sampling	$C_{орг} / C_{орг}$	$N_{орг} / N_{орг}$	$P_{орг} / P_{орг}$	C:N	C:P	N:P
Д/D	<u>0.26</u> 0,16–0,40	<u>0.026</u> 0,006–0,052	<u>0.005</u> 0,004–0,007	<u>24</u> 3,6–75	<u>139</u> 75–233	<u>12</u> 2,5–24
СЛО/SLO	<u>2.03</u> 0,75–4,66	<u>0.101</u> 0,056–0,185	<u>0.013</u> 0,007–0,020	<u>27</u> 4,7–46	<u>457</u> 221–1228	<u>22</u> 7,5–56
ЛЛ/LL	<u>5.13</u> 3,40–7,34	<u>0.458</u> 0,257–0,606	<u>0.040</u> 0,004–0,085	<u>13</u> 10–16	<u>674</u> 204–2115	<u>47</u> 13–132
Л/L	<u>7.45</u> 6,46–9,44	<u>0.952</u> 0,858–1,022	<u>0.060</u> 0,016–0,204	<u>9</u> 7,9–11	<u>672</u> 120–1257	<u>77</u> 11–140
СЛ/SL	<u>3.93</u>	<u>0.229</u>	<u>0.031</u>	<u>20</u>	<u>331</u>	<u>16</u>
С/S	<u>1.81</u> 1,65–1,96	<u>0.114</u> 0,103–0,124	<u>0.017</u> 0,015–0,018	<u>18</u> 16–19	<u>278</u> 239–320	<u>15</u> 13–16

Примечание: в числителе приведены средние значения, в знаменателе – min-max; обозначение местности отбора проб в соответствии с таблицей 1.

Note: numerator is an average, denominator is the min-max range; the marking of sampling sites in according to table 1.

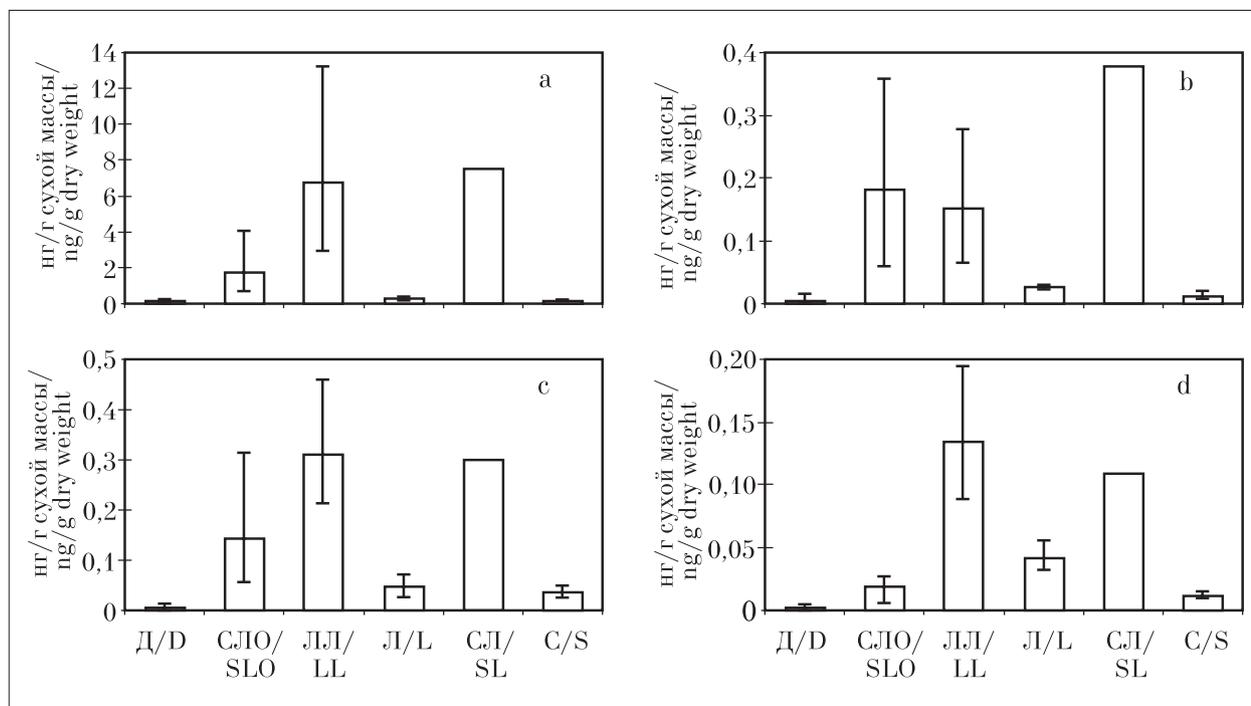


Рис. 2. Средние, минимальные и максимальные концентрации ГХБ (а), α -ГХЦГ (b), p,p' -ДДЭ (c) и ПХБ-153 (d) в почвах о. Ольхон (нг/г сухой массы).
Fig. 2. Mean, minimal and maximal levels of HCB (a), α -HCH (b), p,p' -DDE (c) and PCB-153 (d) in soil of Olkhon Islands (ng/g dry weight)

Разница между максимальным и минимальным содержаниями $C_{орг}$, $N_{орг}$ и $P_{орг}$ в исследованных почвах о. Ольхон значительная (60, 165 и 255 раз соответственно), что позволяет оценить влияние элементного состава ОВ почвы на распределение СОЗ.

Содержание СОЗ в почвах изменялось в следующих пределах: ГХБ – $< 0,008$ –13,2, сумма α - и γ -изомеров ГХЦГ – $< 0,003$ –0,51, сумма ДДТ и его метаболитов – $< 0,005$ –1,17, сумма всех 42 исследованных конгенов ПХБ – $< 0,059$ –2,710 и сумма 6 индикаторных конгенов ПХБ – 0,017–0,780 нг/г сухой массы. Данные величины соответствуют уровням, обнаруженным в фоновых почвах других регионов мира (ПХБ – 5,41 (0,026–96), ГХБ – 0,68 (0,010–5,21) [3], ГХЦГ – 1,86 (0,43–6,72), ДДТ – 1,63 (0,29–4,34) нг/г [17]).

Уровни содержания СОЗ в почвах различались в зависимости от места отбора (рис. 2, табл. 3). Наибольшие концентрации найдены в почвах соснового и лиственничного лесов. Наименьшие – в песке дюн Нюрганского песчаного массива и почвах степи. Уровни СОЗ в почвах в сосновом лесу на останцах песчаного массива были всегда выше, чем в песках дюн, но ниже, чем в почвах лиственничного и соснового лесов. Концентрации СОЗ в луговой почве были ниже, чем в почве соснового леса, расположенного рядом. Различия в содержа-

нии СОЗ в почвах лесных комплексов и на открытых пространствах были статистически достоверны (табл. 3). Также отмечена разница в качественном составе СОЗ в почвах. Так, отношение (ДДД+ДДЭ)/ДДТ было меньше 1 в лесных почвах, тогда как в степных и луговых почвах – больше 1, в песках дюн оно изменялось от 0,76 до 2,4. Относительный гомологический состав ПХБ также различается: доля тетрахлорбифенилов выше в песках дюн, луговой и степной почвах, чем в лесных почвах, а доля гексахлорбифенилов – наоборот выше в лесных почвах (рис. 3).

Влияние древесной растительности на особенности накопления СОЗ в почвах подтверждается также факторным анализом (рис. 4). На содержание СОЗ в почвах открытых пространств (Д+С+Л) оказывает преимущественное влияние прямое сухое газообразное, и сухое, и влажное (дождь, снег) осаждение СОЗ из атмосферного воздуха (фактор I). В случае с территориями, покрытыми древесной растительностью (СЛО+ЛЛ+СЛ), накопление СОЗ в большей степени определяется наличием лесного покрова (фактор II). Хвоя сосны и лиственницы в данном случае является значительным фактором поступления СОЗ в почвы. Известно, что леса служат эффективными фильтраторами взвешенных частиц воздуха [18]. Однако было показано [4], что

Таблица 3 / Table 3

Среднее содержание отдельных СОЗ в почвах о. Ольхон (нг/г) и достоверность различия средних в группах по t-критерию (p) / The mean content of some POPs in soils of Olkhon Island (ng/g) and reliability of difference of averages in groups according to t-criterion (p)

Место отбора Sit of sampling	Среднее содержание, нг/г Mean, ng/g	Достоверность различия средних в группах, p Reliability of difference of means in groups, p					
		Д/D	СЛО/SLO	ЛЛ/LL	Л/L	СЛ/SL	С/S
<i>ГХБ/НСВ</i>							
Д/D	0,01		0,018	0,010	<0,001	<0,001	0,001
СЛО/SLO	1,76	0,018		0,044	0,038	0,016	0,037
ЛЛ/LL	6,73	0,010	0,044		0,012	–	0,022
Л/L	0,30	<0,001	0,038	0,012		<0,001	<0,001
СЛ/SL	7,51	<0,001	0,016	–*	<0,001		<0,001
С/S	0,04	0,001	0,037	0,022	<0,001	<0,001	
<i>α-ГХЦГ/α-НСН</i>							
Д/D	0,01		0,029	0,005	<0,001	<0,001	–
СЛО/SLO	0,18	0,029		–	0,047	–	–
ЛЛ/LL	0,15	0,005	–		0,010	–	0,014
Л/L	0,03	<0,001	0,047	0,010		<0,001	0,002
СЛ/SL	0,38	<0,001	–	–	<0,001		<0,001
С/S	0,01	–	–	0,014	0,002	<0,001	
<i>p,p' – ДДЭ/p,p' – DDE</i>							
Д/D	0,01		0,017	<0,001	0,002	<0,001	0,001
СЛО/SLO	0,14	0,017		0,032	–	–	–
ЛЛ/LL	0,31	<0,001	0,032		<0,001	–	0,001
Л/L	0,05	0,002	–	<0,001		<0,001	–
СЛ/SL	0,30	<0,001	–	–	<0,001		<0,001
С/S	0,04	0,001	–	0,001	–	<0,001	
<i>ΣПХБ₆/ΣPCB₆</i>							
Д/D	0,02		0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
СЛО/SLO	0,11	0,001		<0,001	<0,001	<0,001	0,045
ЛЛ/LL	0,54	<0,001	<0,001		0,006	–	<0,001
Л/L	0,25	<0,001	<0,001	0,006		0,017	<0,001
СЛ/SL	0,46	<0,001	<0,001	–	0,017		<0,001
С/S	0,06	<0,001	0,045	<0,001	<0,001	<0,001	

Примечание: * – отсутствие достоверного различия средних в группах; обозначение местности отбора проб в соответствии с таблицей 1.

Note: * – no significant difference in mean between groups; the marking of sampling sites in according to table 1.

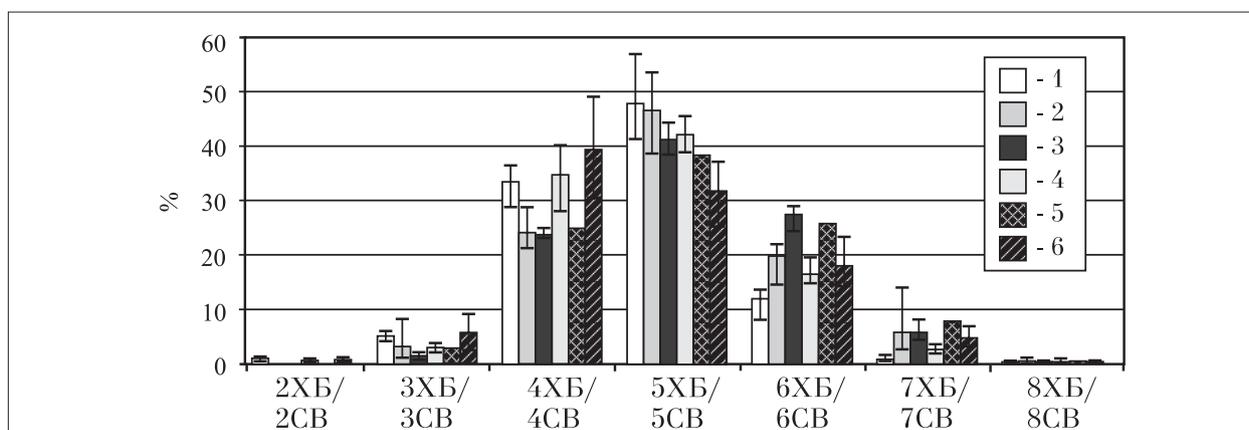


Рис. 3. Относительный гомологический состав ПХБ (%) в почвах о. Ольхон: 1 – Д, 2 – СЛО, 3 – ЛЛ, 4 – Л, 5 – СЛ, 6 – С / Fig. 3. The relative homologous composition of PCB (%) in soil of Olkhon Island 1 – D, 2 – SLO, 3 – LL, 4 – L, 5 – SL, 6 – S

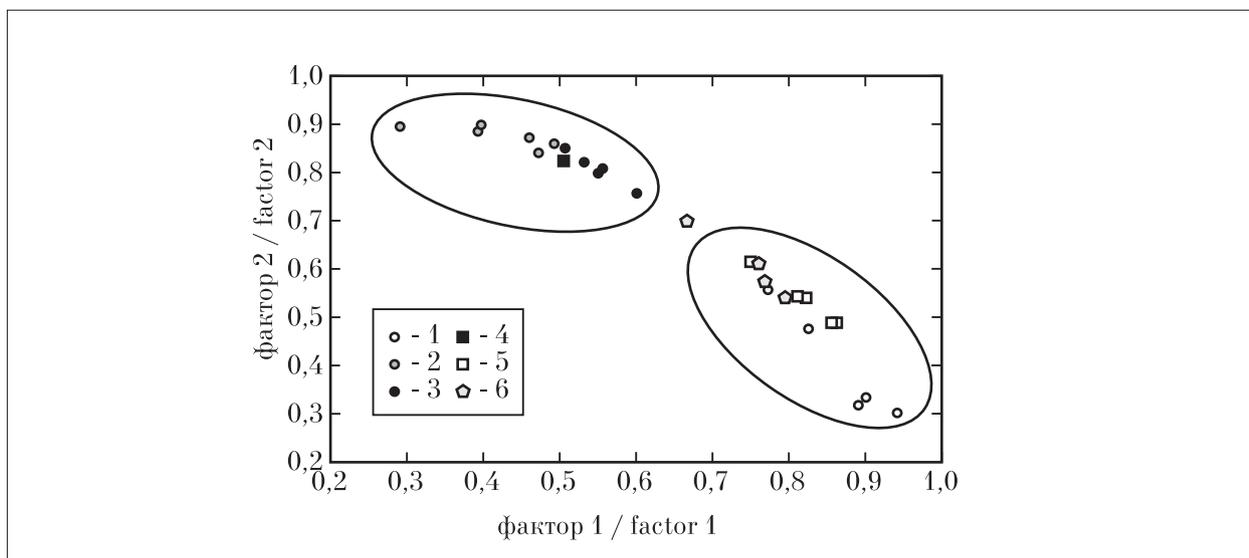


Рис. 4. Группировка проб по результатам факторного анализа состава СОЗ: 1 – Д, 2 – СЛО, 3 – ЛЛ, 4 – Л, 5 – СЛ, 6 – С / **Fig. 4.** The grouping of samples under results of factor analysis of POP composition: 1 – D, 2 – SLO, 3 – LL, 4 – L, 6 – S

при сухом газообразном осаждении фильтрующие свойства леса проявляются только для соединений с коэффициентом распределения октанол-воздух ($\log K_{oa}$) от 7 до 11, т. е. для так называемых «полуволатильных органических соединений» («semivolatile compounds»), к которым относятся также ПХБ и ХОП. Сначала они адсорбируются на поверхности листа или диффундируют в кутикулу. Скорость адсорбции соединения на листе или хвое зависит от физико-химических свойств соединения, характеристик окружающей среды (температура и ветер), структуры и площади поверхности листа, содержания липидов в нём [19]. Далее СОЗ поступают в почву в результате опада отмерших листьев и хвои, а также при эрозии и сбросе воскового слоя листа, вызванного ветром или дождём [20].

Ещё одним фактором, который может оказывать влияние на содержание СОЗ в почвах, является органическое вещество. Был выполнен корреляционный анализ между содержанием СОЗ и органических С, N, P отдельно в лесных почвах и почвах открытых пространств, чтобы избежать влияния фактора различия лесных и травянистых комплексов растительности (табл. 4). Получена сильная статистически достоверная положительная корреляционная связь ($r > 0,7$ при $p < 0,05$) содержания практически всех индивидуальных СОЗ и их групп с содержанием C_{org} как в почвах открытых пространств (С+Л+Д), так и в почвах лесных территорий (СЛО+ЛЛ+СЛ), за исключением октахлорбифенилов (8ХБ) в обеих группах и α - и γ -изомеров ГХЦГ и p,p' -ДДД в лесных почвах. Связь содер-

жания СОЗ и C_{org} в почвах, полученная в нашем исследовании, значительно сильнее, чем в подобных исследованиях, проводимых на больших по размеру территориях [3, 5].

Кроме того, в настоящем исследовании впервые рассмотрена взаимосвязь содержания СОЗ и содержания N_{org} , P_{org} и отношений элементов ОВ (С:N, С:P, N:P) в лесных почвах и почвах открытых пространств. Достоверная положительная взаимосвязь в распределении N_{org} и P_{org} и практически всех изученных СОЗ найдена также в обеих группах почв, за исключением 8ХБ и некоторых пестицидов (табл. 4). Взаимосвязь распределения СОЗ с С:N в обеих группах почв, а также СОЗ и С:P и С:N в лесных почвах слабая и недостоверная. Тогда как в почвах открытых пространств взаимосвязь положительная и достоверная ($r = 0,488-0,803$ при $p < 0,05$).

Различие в накоплении СОЗ в почвах лесных, луговых и степных экосистем оказывает влияние и на результаты расчётов риска для здоровья населения. При случайном пероральном поступлении частиц почвы в организм человека (примерно 50 мг/день в течение всей жизни) с концентрациями СОЗ в лесных почвах, найденными в нашем исследовании, показатели индивидуального канцерогенного риска (ИКР) будут в 7–22 раза выше, а индекс опасности в 2,4–7 раз выше, чем для луговых и степных почв. Показатели ИКР были значительно ниже пренебрежимо малых уровней риска ($1 \cdot 10^{-6}$), а индекс опасности значительно ниже единицы, превышение которой говорит о вероятности возникновения вредных

Таблица 4 / Table 4

Коэффициенты корреляции C, N, P и СОЗ / The coefficient of correlation between C, N, P and POPs

Место отбора проб Site of sampling	Д+С+Л D+S+L	СЛО+ЛЛ+ СЛ SLO+LL+ SL	Д+С+Л D+S+L	СЛО+ЛЛ+ СЛ SLO+LL+ SL	Д+С+Л D+S+L	СЛО+ЛЛ+ СЛ SLO+LL+ SL
Показатели	C _{opr} / C _{org}		N _{opr} / N _{org}		P _{opr} / P _{org}	
ГХБ / HCB	0,957*	0,777	0,964	0,667	0,815	0,770
α-ГХЦГ / α-HCH	0,866	0,398	0,865	0,171	0,685	0,254
γ-ГХЦГ / γ-HCH	0,705	0,414	0,708	0,172	0,526	0,269
ДДД / DDD	0,817	0,511	0,860	0,221	0,611	0,326
ДДЭ / DDE	0,867	0,806	0,798	0,846	0,692	0,442
ДДТ / DDT	0,905	0,781	0,872	0,447	0,666	0,618
2ХБ / 2CB	0,868	–**	0,869	–	0,792	–
3ХБ / 3CB	0,869	0,803	0,852	0,675	0,758	0,452
4ХБ / 4CB	0,955	0,889	0,927	0,889	0,822	0,631
5ХБ / 5CB	0,914	0,894	0,920	0,843	0,741	0,643
6ХБ / 6CB	0,970	0,851	0,928	0,869	0,810	0,644
7ХБ / 7CB	0,959	0,952	0,889	0,768	0,805	0,557
8ХБ / 8CB	0,586	0,610	0,572	0,690	0,259	0,511
ΣПХБ ₄₀ / ΣPCB ₄₀	0,960	0,904	0,941	0,869	0,802	0,634
ΣПХБ ₆ / ΣPCB ₆	0,960	0,871	0,944	0,879	0,794	0,618

Примечание: * – жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции с уровнем значимости $p < 0,05$; ** – нет данных; обозначение местности отбора проб в соответствии с таблицей 1.

Note: * – correlation coefficients with significance level $p < 0.05$ are highlighted by bold type; ** – no data; the marking of sampling sites in according to table 1.

эффектов у человека. Индексы опасности для органов и систем-мишеней изменялись от $2,7 \cdot 10^{-6}$ до $8,6 \cdot 10^{-5}$, а ИКР – от $1,4 \cdot 10^{-10}$ до $1,1 \cdot 10^{-8}$. Для исследованных в данной работе фоновых территорий это означает пренебрежимо малый уровень риска, однако на территориях с высоким уровнем выпадения СОЗ различие между лесными и луговыми или степными участками необходимо учитывать при оценке риска для здоровья человека.

Заключение

Определено содержание органического вещества, его элементного состава и стойких органических загрязнителей в почвах разных фитоценозов на фоновой территории на о. Ольхон (Байкал).

Получена сильная статистически достоверная положительная корреляционная зависимость между содержанием практически всех индивидуальных СОЗ и их групп и C_{opr}, N_{opr} и P_{opr} как в почвах открытых пространств, так и в почвах лесных территорий.

Уровни содержания СОЗ и их качественный состав в почвах статистически различались в

зависимости от фитоценоза на месте отбора. На содержание СОЗ в почвах открытых пространств (дюны, степь, луг) оказывает преимущественное влияние прямое сухое газообразное, сухое посредством частиц, и влажное (дождь, снег) осаждение СОЗ из атмосферного воздуха. Для территорий, покрытых древесной растительностью, накопление СОЗ в большей степени находится под влиянием лесного покрова.

Подтверждено, что леса служат более эффективными адсорбентами СОЗ из атмосферного воздуха, по сравнению с растительностью открытых пространств, а лесная почва накапливает больше СОЗ по сравнению с почвами открытых пространств.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ 15-05-00896 и в рамках выполнения государственного задания по проекту IX.127.1.2. (0350-2016-0026) .

Литература

1. AMAP Assessment Report: Arctic Pollution Issues. Arctic Monitoring and Assessment Program (AMAP). Oslo, 1998. 859 p.

2. AMAP Assessment Report: Persistent toxic substances, food security and indigenous people of the Russian North. Arctic Monitoring and Assessment Program (AMAP). Oslo, 2004. 192 p.

3. Meijer S.N., Ockenden W.A., Sweetman A., Breivik K., Grimalt J.O., Jones K.C. Global distribution and budget of PCBs and HCB in background surface soils: implications for sources and environmental processes // *Environmental Science and Technology*. 2003. V. 37. P. 667–672.

4. McLachlan M.S., Horstmann M. Forests as filters of airborne organic pollutants: a model // *Environ. Sci. Technol.* 1998. V. 32. P. 413–420.

5. Sweetman A.J., Dalla Valle M., Prevedouros K., Jones K.C. The role of soil organic carbon in the global cycling of persistent organic pollutants (POPs): interpreting and modelling field data // *Chemosphere*. 2005. V. 60. P. 959–972.

6. Полихлорированные бифенилы (ПХБ) в Байкальском регионе: источники, дальний перенос и оценка риска (результаты гранта INTAS 2000-00140). Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2005. 52 с.

7. Мамонтова Е.А., Тарасова Е.Н., Кузьмин М.И., Борисов Б.З., Бульбан А.П., Левшина С.И., Лепская Е.В., Трегубов О.Д., Юрченко С.Г., Мамонтов А.А. Распределение стойких органических загрязнителей в системе почва – атмосферный воздух в Сибири и на Дальнем Востоке // *Геоэкология*. 2014. № 5. С. 418–428.

8. Атлас. Иркутская область: экологические условия развития. Иркутск: Институт географии СО РАН, 2004. 90 с.

9. Беркин Н.С., Филиппова С.А., Бояркин В.М., Наумова А.М., Руденко Г.В. Иркутская область (природные условия административных районов). Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1993. 304 с.

10. Касьянова Л.Н., Азовский М.Г., Мазукабов А.М. Структура растительности перевеваемых песковой острова Ольхон (озеро Байкал) // *Бюл. Моск. о-ва испытателей природы. Отд. Биол.* 2007. Т. 112. Вып. 2. С. 41–49.

11. Mamontova E.A., Tarasova E.N., Mamontov A.A., Kuzmin M.I., McLachlan M.S., Khomutova M.Iu. The influence of soil contamination on the concentrations of PCBs in milk in Siberia // *Chemosphere*. 2007. V. 67. P. S71–S78.

12. Теория и практика химического анализа почв. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.

13. Munsell soil-color charts with genuine Munsell color chips. Grand Rapids, MI, USA: Munsell color X-rite, 2013.

14. Р 2.3.10.1920-04. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. 143 с.

15. Black C.A., Goring C.A.I. Organic phosphorus in soils / *Soil and Fertilizer Phosphorus in soils*. ASA, Madison, WI. 1953. P. 123–152.

16. Cleveland C.C., Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass? // *Biogeochemistry*. 2007. V. 85. P. 235–252.

17. Gai N., Pan J., Tang H., Chen S., Chen D., Zhu X., Lu G., Yang Y. Organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in surface soils from Ruergai high altitude prairie, east edge of Qinghai-Tibet Plateau // *Science of the Total Environment*. 2014. V. 478. P. 90–97.

18. Jonas R., Heinemann K. Studies on the dry deposition of aerosol particles on vegetation and plane surfaces // *J. Aerosol Sci.* 1985. V. 16. P. 463–471.

19. Bakker M., Tolls J., Kolloff C. Deposition of atmospheric semivolatile organic compounds to vegetation // *Persistent, bioaccumulative and toxic chemicals I: Fate and exposure*. 2000. Chapter 16. P. 218–236.

20. Horstmann M., McLachlan M.S. Evidence of a novel mechanism of semivolatile organic compound deposition in coniferous forests. *Environ. Sci. Technol.* 1996. V. 30. P. 1794–1796.

References

1. AMAP Assessment Report: Arctic Pollution Issues. Arctic Monitoring and Assessment Program (AMAP). Oslo, 1998. 859 p.

2. AMAP Assessment Report: Persistent toxic substances, food security and indigenous people of the Russian North. Arctic Monitoring and Assessment Program (AMAP). Oslo, 2004. 192 p.

3. Meijer S.N., Ockenden W.A., Sweetman A., Breivik K., Grimalt J.O., Jones K.C. Global distribution and budget of PCBs and HCB in background surface soils: implications for sources and environmental processes // *Environmental Science and Technology*. 2003. V. 37. P. 667–672.

4. McLachlan M.S., Horstmann M. Forests as filters of airborne organic pollutants: a model // *Environ. Sci. Technol.* 1998. V. 32. P. 413–420.

5. Sweetman A.J., Dalla Valle M., Prevedouros K., Jones K.C. The role of soil organic carbon in the global cycling of persistent organic pollutants (POPs): interpreting and modelling field data // *Chemosphere*. 2005. V. 60. P. 959–972.

6. Polychlorinated biphenyls (PCB) in the Lake Baikal region: sources, long rang transport and risk assessment (results of grant INTAS 2000-00140). Irkutsk: Izdatelstvo IG SO RAN, 2005. 52 p. (in Russian).

7. Mamontova E.A., Tarasova E.N., Kuzmin M.I., Borisov B.Z., Bulban A.P., Levshina S.I., Lepskaya E.V., Tregubov O.D., Yurchenko S.G., Mamontov A.A. The distribution of persistent organic pollutants in system of soil – atmospheric air in Siberia and Far East // *Geoekologiya*. 2014. No. 5. P. 418–428 (in Russian).

8. Atlas. Irkutsk Oblast: ecological conditions of development. Irkutsk, 2004. 90 p. (in Russian).

9. Berkin N.S., Filippova S.A., Boyarkin V.M., Naumova A.M., Rudenko G.V. Irkutsk Oblast (natural

conditions in administrative districts). Irkutsk: Izd-vo Irkutskogo universiteta, 1993. 304 p. (in Russian).

10. Kasyanova L.N., Azovskiy M.G., Makukabzov A.M. The structure of flora of dune sands of the Olkhon Island (Lake Baikal) // Bulletin Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody. Otdelenie biologii. 2007. V. 112. No. 2. P. 41–49 (in Russian).

11. Mamontova E.A., Tarasova E.N., Mamontov A.A., Kuzmin M.I., McLachlan M.S., Khomutova M.Iu. The influence of soil contamination on the concentrations of PCBs in milk in Siberia // Chemosphere. 2007. V. 67. P. S71–S78.

12. Theory and practice of chemical analysis of soil. Moskva: GEOS, 2006. 400 p. (in Russian).

13. Munsell soil-color charts with genuine Munsell color chips. Grand Rapids, MI, USA: Munsell color X-rite, 2013.

14. Handbook on human health risk assessment under influence of chemical substances contaminating an environment gtht R 2.3.10.1920-04. Moskva: Federalnyy tsentr gossanepidnadzora Minzdrava Rossii, 2004. 143 p. (in Russian).

15. Black C.A., Goring C.A.I. Organic phosphorus in soils / Soil and Fertilizer Phosphorus in soils. ASA, Madison, WI. 1953. P. 123–152.

16. Cleveland C.C., Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass? // Biogeochemistry. 2007. V. 85. P. 235–252.

17. Gai N., Pan J., Tang H., Chen S., Chen D., Zhu X., Lu G., Yang Y. Organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in surface soils from Ruoergai high altitude prairie, east edge of Qinghai-Tibet Plateau // Science of the Total Environment. 2014. V. 478. P. 90–97.

18. Jonas R., Heinemann K. Studies on the dry deposition of aerosol particles on vegetation and plane surfaces // J. Aerosol Sci. 1985. V. 16. P. 463–471.

19. Bakker M., Tolls J., Kolloffel C. Deposition of atmospheric semivolatile organic compounds to vegetation // Persistent, bioaccumulative and toxic chemicals I: Fate and exposure. 2000. Chapter 16. P. 218–236.

20. Horstmann M., McLachlan M.S. Evidence of a novel mechanism of semivolatile organic compound deposition in coniferous forests. Environ. Sci. Technol. 1996. V. 30. P. 1794–1796.

УДК 543.3

Накопление фторсодержащих соединений в почвах придорожных территорий Московской области

© 2018. Д. Б. Петренко¹, старший преподаватель,
Н. В. Корсакова², к. х. н., с. н. с.,

Н. В. Васильев¹, д. х. н., профессор, заведующий кафедрой,

¹Московский государственный областной университет,
141014, Россия, Московская область, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, 24,

²Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН,
119991, Россия, г. Москва, ул. Косыгина, 19,

e-mail: DBPetrenko@yandex.ru, kaf-obhim@mgou.ru, nikolai-vasiliev@mail.ru

Осуществлена оценка содержания фтора в почвах придорожных территорий Московской области по сети наблюдений, включающей 13 участков, прилегающих к автомобильным дорогам. Установлено, что концентрации фтора в почвах придорожных территорий Московской области на всех исследованных участках превышают фоновое значение, что позволяет говорить об их загрязнённости. В среднем превышение составляет 3,4 раза, максимальное превышение достигает 6,3 раза. Загрязнение фтором исследованных участков в большинстве случаев является достаточно равномерным. Максимальные концентрации фтора обнаружены в верхнем слое почв на глубинах до 10–15 см и существенно снижаются, достигая фоновых на глубинах 25–30 см. На примере участка, прилегающего к Фряновскому шоссе, выявлено монотонное снижение концентраций фтора в почвах при удалении от автомагистрали, что подтверждает причинно-следственную связь выбросов автотранспорта с загрязнением фтором придорожных территорий Московской области.

Ключевые слова: фтор, почвы, экология, Московская область, придорожные территории, автотранспорт.