

УДК 550.424.4

Мониторинг атмосферных выпадений Zn, Cu, Cd, Pb в пределах участка Большого Васюганского болота

А.А. Синюткина¹, Ю.А. Харанжевская^{1,2*}

¹ Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал СФНЦА РАН
634050, г. Томск, ул. Гагарина, 3

² Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 20.01.2020 г.

Представлена оценка вклада пирогенного фактора в загрязнение атмосферы фоновых территорий Томской области на основе анализа выпадений тяжелых металлов Zn, Pb, Cu и Cd в пределах Бакчарского болотного массива (северо-восточный отрог Большого Васюганского болота). Мониторинг атмосферных выпадений Cu, Pb, Zn, Cd проводился методом пассивного оседания пыли по содержанию частиц на 1 м² в 2018–2019 гг. Анализ данных показал превышение содержания Zn в составе атмосферных выпадений в пределах болота, сохраняющееся в течение трех лет после пожара как в летний, так и в зимний периоды, с максимальным значением 3630 мкг/м²·мес. в 2018 г. Повышенное содержание Cd и Pb в атмосферных выпадениях в пределах болота сохранялось в течение двух лет после пожара. Повышение Cu в составе атмосферных выпадений в результате пирогенного фактора не обнаружено. Анализ сезонной динамики за 2019 г. показал, что на содержание в составе атмосферных выпадений Zn, Cd, Pb природные пожары повлияли как на локальном (20–30 км от мониторинговых площадок), так и на региональном уровне (обширные лесные пожары в Восточной Сибири).

Ключевые слова: атмосфера, тяжелые металлы, природный пожар, загрязнение атмосферы, Западная Сибирь; atmosphere, heavy metals, wild fire, atmosphere pollution, West Siberia.

Введение

Рост городов и увеличение антропогенной нагрузки со второй половины XX в. стали причиной значительного повышения пожарной активности [1]. В то же время изменения климата, связанные с повышением температуры воздуха и изменением характера атмосферной циркуляции [2], приводят к увеличению частоты сухих пожароопасных периодов. В результате природных пожаров изменяются геохимические характеристики ландшафта не только на выгоревших площадях, но и на прилегающих к ним территориях. Выбросы от горения биомассы представляют собой важный глобальный источник частиц и газов в атмосфере. Эмиссия тяжелых металлов от природных пожаров может вызвать как локальное, так и региональное загрязнение атмосферы [3–5]. В некоторых случаях атмосферный перенос загрязняющих веществ составляет тысячи километров за счет способности некоторых элементов переноситься на субмикронных аэрозолях [6].

В результате природных пожаров в Сибири в атмосферу ежегодно поступает 300–500 млн т продуктов сгорания растительной биомассы в виде

газообразных веществ и аэрозольных частиц. Массовая доля аэрозольной эмиссии варьируется от 1–2 до 3–7% от сгоревшей биомассы [7, 8].

Горение биомассы сопровождается, с одной стороны, вовлечением в воздушную эмиссию тяжелых металлов, с другой – пассивным накоплением ряда металлов на постпирогенных участках [5]. При верховых пожарах активно мигрируют Hg, Cd, As, Zn, Mg, в меньшей степени – Cu и Pb. В связи с высокой температурой кипения миграция Pb в составе дымового шлейфа происходит при пожарах высокой интенсивности, когда температура горения достигает 1000–1200 °С. Медь, основным источником которой в атмосфере являются предприятия цветной металлургии, накапливается на горячих и не участвует в атмосферном переносе в составе дымовых аэрозолей [5, 7, 9]. Pb и Cd относятся к числу наиболее опасных металлов, которые могут вызвать сильное и длительное загрязнение окружающей среды. Cu и Zn – биогенные элементы, но в высоких концентрациях также могут негативно влиять на здоровье человека [10, 11].

Следует отметить, что систематический мониторинг современных выпадений тяжелых металлов осуществляется преимущественно в крупных городах, в основном отражает загрязнение атмосферы в пределах городской агломерации и не характеризует фоновые и региональные выпадения тяжелых металлов.

* Анна Алексеевна Синюткина (ankalaeva@yandex.ru);
Юлия Александровна Харанжевская (kharan@yandex.ru).

Цель настоящей работы — оценка вклада пирогенного фактора в загрязнение атмосферы фоновых территорий Томской области на основе анализа выпадений тяжелых металлов Pb, Cu, Zn и Cd в пределах Бакчарского болотного массива (северо-восточный отрог Большого Васюганского болота).

Материалы и методы

Объект исследования — участок Бакчарского болотного массива, расположенный вдали (> 200 км) от основных источников загрязнения — городских агломераций и предприятий нефтегазодобывающего комплекса. Рассматриваемая территория находится под влиянием дальнего переноса загрязняющих элементов в составе парогазовой фракции аэрозоля, а также подвержена локальным и региональным загрязнениям в результате лесных и торфяных пожаров.

Территория Бакчарского болота была частично осушена в 1985–1987 гг. на площади 77 км² [12]. Осушительная мелiorация верхового болота приводит к периодическому возникновению пожаров. Один из крупных пожаров произошел в августе–октябре 2016 г. Наиболее интенсивное горение участка отмечено в период 11–18 августа 2016 г., когда пожаром было охвачено 80% площади пирогенного участка, преимущественно в пределах осушенного сосново-кустарничково-сфагнового верхового болота. Выгорание лесной части произошло в октябре 2016 г. Площадь распространения пожара составила 5,54 км², в том числе в пределах болота — 4,44 км² [13]. Кроме того, в октябре 2019 г. был отмечен пожар в восточной части Бакчарского болотного массива и прилегающего к нему леса в 20–27 км от мониторинговых площадок.

Мониторинг атмосферных выпадений Cu, Pb, Zn и Cd проведен на пяти площадках в пределах выгоревших и фоновых участков Бакчарского болотного массива (таблица). В качестве фоновых значений использованы данные мониторинговых площадок, расположенных в 8 км от контура постпирогенного участка. Сравнительный анализ состава атмосферных выпадений на постпирогенном и фоновых участках проведен за 2018–2019 гг., включая два летних и один зимний периоды. Ана-

лиз сезонной динамики атмосферных выпадений проведен по данным, полученным за летний период 2019 г. на мониторинговой площадке в пределах сосново-кустарничкового осоково-сфагнового болота.

Анализ атмосферных выпадений Cu, Pb, Zn, Cd проводился методом пассивного оседания пыли (разработанного Геологической службой США) по содержанию частиц на 1 м² за интервал времени с применением пластиковых пробоотборников, установленных на высоте 2 м. Стеклообразные шарики помещались в сетку, закрепленную на 3–4 см ниже края пробоотборника. Перед установкой пробоотборник тщательно промывался дистиллированной водой [14]. Снятие проб проводилось с периодичностью 1–6 мес. Атмосферные выпадения Cu, Pb, Zn, Cd, мкг/м² · мес. рассчитывались по формуле

$$A = \frac{K_1 V + K_2 m}{t S},$$

где K_1 — концентрация элемента в жидкой части пробы, мкг/дм³; K_2 — концентрация элемента в твердой части пробы, мкг/кг; V — объем жидкой части пробы, дм³; m — масса твердой части пробы, г; t — период установки пробоотборника, мес.; S — площадь поверхности пробоотборника, м².

Пробы анализировались после предварительного кислотного разложения методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) в химико-аналитическом центре «Плазма» (г. Томск) [15, 16].

Результаты и обсуждение

Исследования по оценке содержания тяжелых металлов в составе атмосферных выпадений на территории Бакчарского болота в 8 км от пирогенного участка в год пожара (2016 г.) показали высокое содержание Zn (3630 мкг/м² · мес.). В 2017 г. выпадение Zn снизилось в 2 раза по сравнению с 2016 г., а в 2018 г. уменьшилось до значений 2015 г. (190 мкг/м² · мес.) [17]. Поэтому с 2018 г. данные мониторинговых площадок, расположенных на расстоянии 8 км от постпирогенного участка, использовались как фоновые.

Характеристика объектов исследования в пределах Бакчарского болотного массива

Площадка	Микроландшафт	Период наблюдений	Расстояние от контура пожара 2016 г., км	Координаты
1	Выгоревший участок сосново-кустарничково-сфагнового болота	апрель 2018 – сентябрь 2019 г.	–	56°53'18,6" 82°40'36,7"
2	Осушенное сосново-кустарничково-сфагново-е болото	апрель 2018 – сентябрь 2019 г.	0,2	56°53'25,8" 82°40'50,5"
3	Сосново-кустарничково-осоково-сфагново-е болото	сентябрь 2015 – октябрь 2019 г.	8	56°58'15,3" 82°36'09,7"
4	Сосново-кустарничково-сфагново-е болото	апрель – сентябрь 2019 г.	8	56°58'24,3" 82°36'41,2"
5	Осоково-сфагново-е болото	апрель 2016 – сентябрь 2019 г.	8	56°58'17,3" 82°37'04,5"

Объем атмосферных выпадений Zn на ключевых участках за 2018–2019 гг. изменялся в пределах 140–1660 мкг/м²·мес. Максимальное содержание Zn характерно для постпирогенного участка в летний период 2019 г., а минимальное наблюдалось в зимний период и изменялось от 350 мкг/м² × мес. на постпирогенном участке до 140 мкг/м²·мес. на фоновых, что в среднем в 1,5 раза ниже значений за летний период 2018 г. Летом 2019 г. отмечено повышение содержания Zn в составе атмосферных выпадений в среднем в 6 раз, что может быть связано с загрязнением атмосферы продуктами горения в результате лесных пожаров в Восточной Сибири (рис. 1).

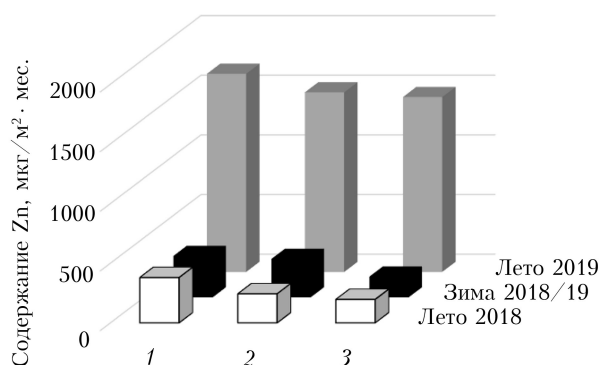


Рис. 1. Динамика содержания Zn в составе атмосферных выпадений: 1 – постпирогенный участок; 2 – участок осушенного болота в 200 м от контура пожара; 3 – среднее значение для фоновых участков

Содержание Cd в составе атмосферных выпадений за 2018–2019 гг. изменялось в пределах 0,22–2 мкг/м²·мес. (рис. 2). Максимальное значение наблюдалось на постпирогенном участке в летний период 2018 г. и превышало значение фоновых участков в 2,5–9 раз, что является следствием пожара 2016 г. В зимний период 2018–2019 гг. выпадение Cd снижается в среднем до 0,49 мкг/м²·мес., значения пирогенного и фоновых участков не различаются. Летом 2019 г. содержание Cd на постпирогенном участке также не превышает фоновое.

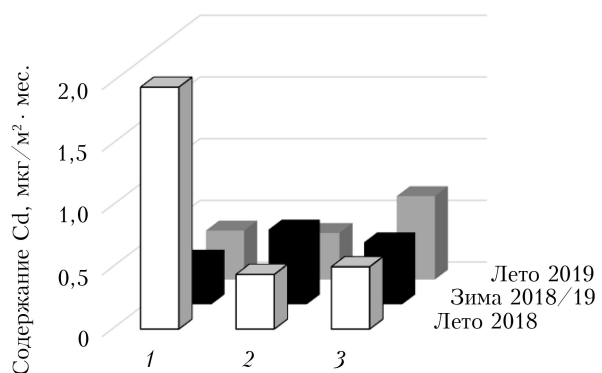


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, для Cd

Содержание Pb в составе атмосферных выпадений изменяется в пределах 14–200 мкг/м²·мес. Максимальное значение наблюдалось в летний период 2018 г. на постпирогенном участке, что выше значений для фоновых участков в среднем в 3,7 раза. В зимний период содержание Pb в составе атмосферных выпадений снижается в среднем до 40 мкг/м²·мес. и одинаково для постпирогенного и фоновых участков. Летом 2019 г. содержание Pb уменьшилось в 5,6 раза по сравнению с аналогичным периодом 2018 г., значимые различия между постпирогенным и фоновыми участками отсутствуют (рис. 3).

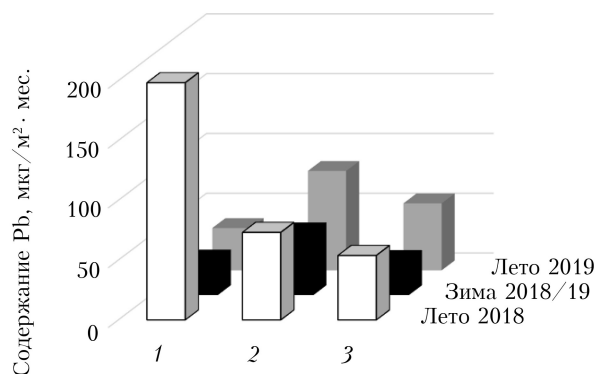


Рис. 3. То же, что и на рис. 1, для Pb

Содержание Cu в составе атмосферных выпадений изменяется в пределах 18–180 мкг/м²·мес. Максимальное содержание Cu наблюдается на участке, расположенном в непосредственной близости к постпирогенному, в то время как между постпирогенным и фоновыми участками различия практически отсутствуют. Минимальное выпадение Cu характерно для зимнего периода, среднее значение для всех участков – 23 мкг/м²·мес. В летний период 2019 г. максимальное значение (140 мкг/м² × мес.) отмечено в пределах фоновых участков (рис. 4).

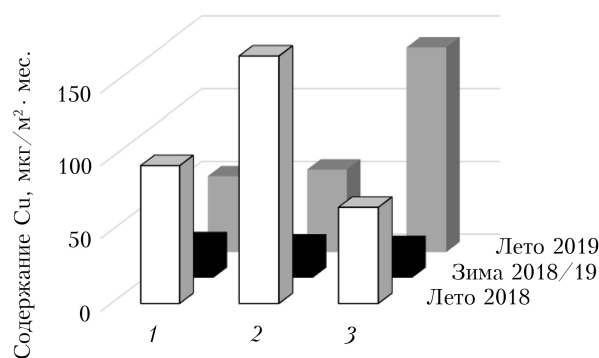


Рис. 4. То же, что и на рис. 1, для Cu

Анализ сезонной динамики атмосферных выпадений на фоновом участке сосново-кустарничково-осоково-сфагнового болота в 2019 г. позволил

выявить следующие закономерности. Содержание Zn в составе атмосферных выпадений изменяется с мая по октябрь от 1160 до 4010 мкг/м²·мес. и определяется влиянием природных пожаров. Локальный перенос загрязнений, связанный с лесными и торфяными пожарами в радиусе 20–30 км в октябре 2019 г., способствует увеличению содержания Zn в составе твердой части атмосферных выпадений в 2 раза по сравнению с предыдущим месяцем. Влияние регионального переноса загрязняющих веществ в результате лесных пожаров в Восточной Сибири проявляется в увеличении содержания Zn преимущественно в растворенной форме, что было отмечено в июле 2019 г. В сезонной динамике содержания Cd наблюдаются более высокие значения в первой половине летнего периода (май–июнь) с последующим снижением в августе–сентябре в среднем до 0,4 мкг/м²·мес. и повторным увеличением в октябре до 0,9 мкг/м²·мес., что согласуется с ходом пирогенной активности в регионе. Содержание Pb снижается от 60 мкг/м²·мес. в июне до 27 мкг/м²·мес. в августе–сентябре с дальнейшим подъемом до 40 мкг/м²·мес. в октябре, что может быть связано с пожаром в этот период. Содержание Cu в течение рассматриваемого периода изменяется в пределах от 100 до 300 мкг/м²·мес. с максимумом в августе и средним значением 160 мкг/м²·мес.

По результатам наблюдений отмечено превышение содержания Zn в составе атмосферных выпадений в пределах постпирогенного участка по сравнению с фоновыми за 2018–2019 гг. в среднем в 2 раза. Превышение содержания Zn продолжает сохраняться в течение трех лет после пожара на осушенном болоте как в летний, так и зимние периоды наблюдений. Пирогенный фактор вносит существенный вклад в содержание Cd в составе атмосферных выпадений. На постпирогенном участке его содержание через два года после пожара превышает фоновые значения в 2,5–9 раз, при этом на третий год различий между участками уже не наблюдается. Поступление Pb в меньшей степени определяется пирогенным фактором, чем Zn и Cd. Содержание Pb в составе атмосферных выпадений на рассматриваемых участках может быть связано с региональным переносом загрязняющих веществ от источников загрязнений, находящихся за пределами Томской обл., в составе парогововой фракции аэрозоля. Пирогенный фактор не влияет на содержание Cu в атмосферных выпадениях. Это может объясняться низкой летучестью элемента, вследствие чего происходит его аккумуляция на выгоревших участках. Содержание Cu определяется переносом загрязняющих веществ от промышленных предприятий, находящихся за южной границей Томской обл., в том числе предприятий цветной металлургии в Новосибирске. Различия в содержании Cu на мониторинговых площадках может объясняться локальными условиями и попаданием в пробоотборник растительного материала в составе эолового переноса. На сезонную динамику содер-

жения в составе атмосферных выпадений Zn, Cd и, в меньшей степени, Pb влияют природные пожары, вызывающие перенос загрязняющих веществ как на локальном, так и на региональном уровне. Полученные выводы согласуются с опубликованными данными о миграционной способности элементов в ходе природных пожаров и об источниках загрязнения атмосферы тяжелыми металлами [5, 7, 9].

Заключение

В составе атмосферных выпадений среди рассмотренных элементов преобладает Zn, далее следуют Cu, Pb и Cd. Наибольшие различия между постпирогенным и фоновыми участками характерны для Pb и Cd в летний период 2018 г. В летний период 2019 г. состав атмосферных выпадений характеризовался повышенным содержанием Zn по сравнению с данными 2017–2018 г. на всех мониторинговых площадках, что связано с его поступлением в составе дымового шлейфа во время обширных лесных пожаров в Восточной Сибири в июле. Локальные пожары в радиусе 20–30 км от мониторинговых площадок оказали наибольшее влияние на содержание Cd, в меньшей степени – Zn и Pb. Содержание Cu в составе атмосферных выпадений не подвержено влиянию пирогенного фактора и связано в основном с переносом загрязняющих веществ от промышленных предприятий, находящихся за южной границей Томской области.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ по научному проекту № 18-44-70005 (определение содержания тяжелых металлов в пределах пирогенного участка), а также в рамках государственного задания по теме ПНИ РАН № 0778-2019-0005 (мониторинг содержания тяжелых металлов в пределах фоновых территорий).

1. *Lamentowicz M., Stowiński M., Marcisz K., Zielińska M., Kaliszan K., Lapshina E., Gilbert D., Buttlar A., Fialkiewicz-Koziel B., Jassey V.E.J., Laggoun-Defarge F., Kotaczek P.* Hydrological dynamics and fire history of the last 1300 years in western Siberia reconstructed from a high-resolution, ombrotrophic peat archive // *Quarter. Res.* 2015. N 84(3). P. 312–325.
2. *Паромов В.В., Земцов В.А., Копысов С.Г.* Климат Западной Сибири в фазу замедления потепления (1986–2015 гг.) и прогнозирование гидроклиматических ресурсов на 2021–2030 гг. // *Изв. Томс. политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов.* 2017. Т. 328, № 1. С. 62–74.
3. *Yamasoe M.A., Artaxo P., Miguel A.H., Allen A.G.* Chemical composition of aerosol particles from direct emissions of vegetation fires in the Amazon Basin: water-soluble species and trace elements // *Atmos. Environ.* 2000. V. 34, N 10. P. 1641–1653.
4. *Щербов Б.Л., Лазарева Е.В., Журкова И.С.* Лесные пожары и их последствия (на примере сибирских объектов). Новосибирск: Гео, 2015. 154 с.
5. *Журкова И.С., Щербов Б.Л.* Миграция химических элементов при лесном низовом пожаре (Алтайский край) // *Изв. Иркутс. гос. ун-та. Науки о Земле.* 2016. Т. 16. С. 30–41.
6. *Паромов Е.Г., Ишутин Я.Н.* Крупные лесные пожары в Алтайском крае. Барнаул: Дельта, 1999. 193 с.

7. Щербов Б.Л., Лазарева Е.В., Будашкина В.В., Мягкая И.Н., Журкова И.С. Изменение форм нахождения тяжелых металлов в почвенно-растительном покрове после лесного пожара // Сиб. экол. журн. 2014. № 5. С. 789–801.
8. Самсонов Ю.Н., Иванова Г.А. Причины и последствия пожаров в бореальных лесах Сибири // Регион: экономика и социология. 2014. № 1(81). С. 257–271.
9. Ramirez O., de la Campa A.M.S., Sánchez-Rodas D., de la Rosa J.D. Hazardous trace elements in thoracic fraction of airborne particulate matter: Assessment of temporal variations, sources, and health risks in a megacity // Sci. Total Environ. 2020. V. 710. P. 136344.
10. Stankov Jovanovic V.P., Ilic M.D., Markovic M.S., Mitic V.D., Nikolic Mandic S.D., Stojanovic G.S. Wild fire impact on copper, zinc, lead and cadmium distribution in soil and relation with abundance in selected plants of Lamiaceae family from Vidlic Mountain (Serbia) // Chemosphere. 2011. N 84. P. 1584–1591.
11. Blagojevic N., Damjanovic-Vratnica B., Vukasinovic-Pesic V., Djurovic D. Heavy metals content in leaves and extracts of wild-growing *Salvia officinalis* from Montenegro // Pol. J. Environ. Stud. 2009. N 18. P. 167–173.
12. Гашкова Л.П., Синюткина А.А. Оценка трансформации осушенного верхового болота (на примере участка Бакчарского болотного массива) // Вестн. Томс. гос. ун-та. Биология. 2015. № 1 (29). С. 164–179.
13. Sinyutkina A.A., Gashkova L.P., Ivanova E.S. Mapping post fire recovery in Bakchar bog with Landsat time series data // IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci. 2019. N 381. 012084.
14. Reheis M.S. Dust deposition in Nevada, California and Utah, 1984–2002 // U.S. Geological Survey. Open-File Report. 2003. N 03-138. 11 p.
15. ГОСТ Р 56219-2014. Вода. Определение содержания 62 элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. М.: Стандартинформ, 2015. 32 с.
16. ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. 2005. 30 с.
17. Харанжевская Ю.А., Синюткина А.А., Гашкова Л.П. Интегральная оценка пирогенной нагрузки по содержанию Cu, Pb, Zn и Cd в компонентах Васюганского болота (Западная Сибирь) // Геосферные исслед. 2019. № 4(13). С. 62–73.

A.A. Sinyutkina, Yu.A. Kharanzhevskaya. Monitoring of atmospheric deposition of Zn, Cu, Cd, and Pb within the area of the Great Vasyugan mire.

The article presents the assessment result of the pyrogenic factor contribution to atmospheric pollution in the background territories of the Tomsk region based on the analysis of heavy metal (Zn, Pb, Cu, and Cd) atmospheric deposition within the Bakchar bog (the north-eastern part of the Great Vasyugan mire). The analysis of atmospheric depositions of Cu, Pb, Zn, and Cd was carried out using the method of passive dust deposition by the content of particles per 1 m² during 2018–2019. Data analysis showed an excess of Zn in atmospheric depositions that persists for three years after a fire in a drained mire during both summer and winter observation periods with a maximum value of 3.63 mg/m² per month in 2018. The impact of the fire on Cd and Pb content was maintained for two years after the fire. The Cu content in atmospheric depositions is not affected by the pyrogenic factor. The analysis of seasonal dynamics showed that the content of Zn, Cd, and Pb in the composition of atmospheric depositions was influenced by wild fires that cause the transfer of pollutants both on the local and regional scales.