

УДК 550.47
DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4924
Шифр специальности ВАК 1.6.21
Научная статья

Постпирогенная трансформация поглощения элементов растениями болот таёжной и лесотундровой зон Западной Сибири

Л.П. Гашкова✉, А.А. Синюткина

*Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа –
филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН, Россия, г. Томск*

✉Gashkova-lp@rambler.ru

Аннотация. Актуальность. Природные пожары кардинально меняют условия существования экосистем. Процесс восстановления экосистемы растягивается на многие годы, зависит от многих факторов и нуждается в изучении. На болоте индикатором трансформации биогеохимических циклов может служить химический состав торфа и растений постпирогенных участков. **Цель.** Сравнить интенсивность поглощения элементов растениями-доминантами каждого яруса на ненарушенных и постпирогенных болотах разных регионов спустя 6–8 лет после пожара. **Методы.** Использовались сравнительно-географические, экспедиционные методы, методы ландшафтных описаний ключевых участков, сопряжённого анализа, биогеохимические, статистические и некоторые другие. **Результаты и выводы.** Представлены результаты исследований постпирогенных участков болот, расположенных в таёжной и лесотундровой зонах Западной Сибири. На трёх болотных массивах, два из которых расположены в таёжной зоне и один в лесотундре, отобраны образцы растений-доминантов каждого яруса и торфа в корнеобитаемом слое на фоновом и постпирогенном участках. В отобранных образцах проводилось определение концентрации Na, Mg, P, K, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn, Cd и Pb. Обнаружено, что характерной особенностью постпирогенных участков болот является повышенное содержание Zn и Cd в растениях и торфе, по сравнению с фоновыми болотами. При сравнении интенсивности поглощения установлено, что характерной особенностью постпирогенных участков является увеличение коэффициента биологического поглощения Cd и уменьшение коэффициента биологического поглощения Mn. В результате исследования выяснилось, что постпирогенная трансформация выражается в количественном изменении химического состава торфа и растений, причём у каждого вида обнаружили особенности поглощения элементов в разных геохимических условиях.

Ключевые слова: пожары, болото, тяжелые металлы, биогенная миграция, биогеохимические коэффициенты

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 22-77-10024.

Для цитирования: Гашкова Л.П., Синюткина А.А. Постпирогенная трансформация поглощения элементов растениями болот таёжной и лесотундровой зон Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 9. – С. 227–238. DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4924

UDC 550.47
DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4924
Scientific paper

Post-fire transformation of element uptake by plants in mires in the taiga and forest-tundra zones of Western Siberia

L.P. Gashkova✉, A.A. Sinyutkina

*Siberian Federal Scientific Center of Agro-Bio Technologies of the Russian Academy of Sciences,
Siberian Research Institute of Agriculture and Peat, Tomsk, Russian Federation*

✉Gashkova-lp@rambler.ru

Abstract. Relevance. Wildfires dramatically change the conditions for the existence of ecosystems. Ecosystem restoration stretches for many years and depends on many factors. In the mire, the chemical composition of peat and plants in post-pyrogenic sites serves as an indicator of the transformation of biogeochemical cycles. **Aim.** To compare the intensity of element absorption by plants-dominants of each tier in pristine and post-pyrogenic mires of different regions 6–8 years after the fire. **Methods.** Comparative-geographical, expeditionary, landscape descriptions of key sites, conjugate analysis, biogeochemical, statistical and some other methods. **Results and conclusions.** The paper presents the results of studies of post-pyrogenic sites of mires located in the taiga and forest-tundra zone of Western Siberia. In three mires, two of which are located in the taiga zone and one in the forest-tundra, the authors have collected the samples of dominant plants of each tier and peat in the root zone in the pristine and post-pyrogenic sites. In the collected samples, we determined the concentration of Na, Mg, P, K, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn, Cd and Pb. We found that a characteristic feature of the post-pyrogenic sites of the mires is an increased content of Zn and Cd in plants and peat, compared to the pristine mires. When comparing the intensity of absorption of elements, we found that in the post-pyrogenic sites, the biological absorption coefficient of Cd increases and the biological absorption coefficient of Mn decreases. We found that post-pyrogenic transformation is expressed in a quantitative change in the chemical composition of peat and plants, and for each species we found features of element absorption in different geochemical conditions.

Keywords: fires, mire, heavy metals, biogenic migration, biogeochemical coefficients

Acknowledgments. The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, project no. 22-77-10024.

For citation: Gashkova L.P., Sinyutkina A.A. Post-fire transformation of element uptake by plants in mires in the taiga and forest-tundra zones of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 9, pp. 227–238. DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4924

Введение

Воздействие огня на экосистемы в течение сотен миллионов лет формировало и поддерживало структуру сообществ, являясь важной эволюционной силой [1]. Постпирогенные изменения сказываются на геохимических параметрах экосистем длительное время, десятилетия и даже столетия [2, 3]. Пожары на болотах возникают, как правило, при понижении уровня болотных вод, чаще всего в результате деятельности человека. Условия обитания растений на болоте после пожара резко меняются, что выражается в смене многих физико-химических параметров на поверхности торфяной залежи. Изменяется не только концентрация элементов в торфе, но и их доступность для растений [4, 5]. На накопление элементов в растениях влияют вид растения, регион произрастания, степень нарушенности экосистемы и другие характеристики окружающей среды [6, 7]. Поэтому изучение поглощения и накопления элементов позволяет узнать потребности и пределы толерантности растений к каждому элементу [8–11]. Изменения коэффициентов биологического поглощения (КБП) элементов при изменении доступности питательных веществ в окружающей среде отражает стратегию адаптации вида, способность поддерживать относительно постоянные концентрации элементов в определенных тканях [12, 13]. Данные по концентрации элементов в растениях болот Западной Сибири недостаточны. Изучено содержание элементов в некоторых видах растений [14–18] и в торфе [19–24]. Данных по соотношению элементов в растениях и торфе для нашей территории немного [15, 25].

В данной работе представлены результаты исследования биогеохимических параметров как часть проводимого нашим коллективом комплексного изучения постпирогенных и ненарушенных болот таежной и лесотундровой зон Западной Сибири, включающего анализ постпирогенного изменения основных компонентов экосистемы (растения, торф и болотные воды [6]). Анализ способности растений поглощать и накапливать элементы в своих тканях при изменении геохимического фона необходим для определения степени изменения экосистемы после пожара и в процессе восстановления растительности. Цель исследования состоит в оценке трансформации поглощения элементов из торфа растениями-доминантами каждого яруса на ненарушенных и постпирогенных участках верховых болот. В процессе исследования ставились задачи сравнения данных с ненарушенными и постпирогенными участками, расположенными в разных природных зонах, по следующим параметрам: содержанию элементов в корнеобитаемом слое торфа, содержанию элементов в ассимиляционных органах растений, интенсивности биологического поглощения элементов для исследуемых видов.

Объекты и методика исследования

Исследования проводились на трёх болотных массивах, расположенных на Западно-Сибирской равнине. Согласно классификации О.Л. Лисс и др. [26], два болотных массива расположены в южнотаёжной болотной провинции западно-сибирских олиготрофных сосново-кустарничково-сфагновых и грядово-мочажинных, мезотрофных и эвтрофных сосново-берёзово-осоково-гипновых (или сфагно-

вых) и осоково-гипновых (или сфагновых) болот и один – в западно-сибирской лесотундровой области пребореально-бореальных эвтрофно-олиготрофных бугристых кустарничково-мохово-лишайниковых, мохово-лишайниковых и травяно-моховых болот умеренного торфонакопления (рис. 1).

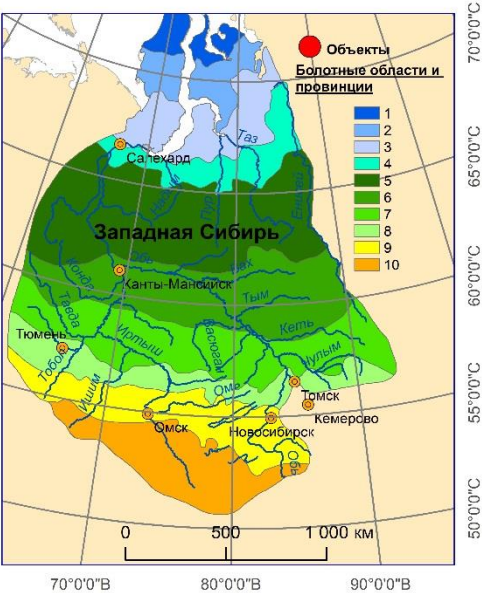


Рис. 1. Схема расположения объектов исследования относительно болотных областей и провинций [26]: 1 – арктическая тундровая провинция; 2 – типичная тундровая провинция; 3 – южная тундровая провинция; 4 – лесотундровая область; 5 – северотаёжная провинция; 6 – среднетаёжная провинция; 7 – южнотаёжная провинция; 8 – подтаёжная провинция; 9 – лесостепная провинция; 10 – степная провинция

Fig. 1. Scheme of the location of the research objects relative to the mires regions and provinces [26]: 1 – arctic tundra; 2 – typical tundra; 3 – southern tundra; 4 – forest-tundra; 5 – northern taiga; 6 – middle taiga; 7 – southern taiga; 8 – subtaiga; 9 – forest-steppe; 10 – steppe

Объекты исследования были выбраны по признаку максимального сходства ненарушенных и постпирогенных участков до пожара по растительности и ботаническому составу торфяной залежи, на верховых болотах (табл. 1). Растительность участков Бакcharского и Усть-Бакcharского болот представляет собой сосново-кустарничково-сфагновый фитоценоз. В верхних слоях торфяной залежи доминирует фускум-торф. Мощность торфяной залежи составляет 2,5–3 м. Плоскобугристое болото отличается отсутствием древесного яруса, с кустарничково-лишайниково-сфагновыми буграми и травяно-сфагновыми мочажинами. Верхние слои торфяной залежи на буграх сложены фускум-

торфом, в мочажинах – балтикум-торфом. Мощность торфяной залежи менее метра. Фоновые участки подбирались на аналогичных микроландшафтах, за пределами контура пожара. На точках BF и UBF полностью выгорел древесный и травяно-кустарничковый ярус, моховой ярус выгорел в понижениях и на склонах кочек. На участке PF от огня значительно пострадали кустарничковый и моховой ярусы. Подробное описание участков исследования опубликовано в [27].

Таблица 1. Объекты исследования
Table 1. Study objects

Расположение и название болота Mire location and name	Код участка Site code		Год выгорания Year of the fire	Координаты Coordinates	Антропогенная нагрузка Anthropogenic load
	Фоновый Pristine	Постпирогенный Post-pyrogenic			
Междуречье Бакchar и Чаи, «Бакcharское» Interfluvium of Bakchar and Chaya, "Bakcharskoe"	BB	BF	2016	56°53' N 82°41' E	Осушение Draining
Терраса р. Бакchar «Усть-Бакcharское» River Bakchar terrace "Ust-Bakcharskoe"	UBB	UBF	2014	57°35' N 82°16' E	Осушение Draining
Междуречье Пура и Надыма «Плоскобугристое» Pur and Nadym interfluvium "Palsa"	PB	PF	2016	65°52' N 74°58' E	Нефтегазодобыча Oil and gas production

Исследования проводились в июле 2022 г. На положительных формах микро рельефа отбирались пробы ассимиляционных органов растений-доминантов каждого яруса (однолетний прирост *Sphagnum fuscum* (Schimp.) Klinggr, *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench) и *Pinus sylvestris* L. на всех, кроме PB и PF). Сравнение интенсивности поглощения элементов проводилось при помощи вычисления КБП, который рассчитывался как отношение содержания элемента в золе растения к его содержанию в почве [28]. С этой целью отбирались пробы верхнего слоя торфа непосредственно на глубине сосредоточения основной массы живых корешков возле отобранных растений. Для *S. fuscum* торф отбирался на вершинах кочек, под слоем живого мха, до глубины 10 см. На каждом участке отбирались по три смешанных пробы (минимум с 10 экземпляров) для каждого вида растений. Аналогично отбирались образцы торфа в корнеобитаемой зоне растений. Пробоподготовка заключалась в сушке растений и торфа до воздушно-сухого состояния и их измельчении. В отобранных образцах определялась зольность по ГОСТ Р 56881-2016, содержание Na, Mg, P, K, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn, Cd и

Pb – методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) с предварительным разложением азотной кислотой с добавлением плавиковой кислоты в Химико-аналитическом центре «Плазма» (г. Томск).

Для оценки зависимости между переменными применялся коэффициент ранговой корреляции Спирмена. Сравнение и значимость отличий между выборками устанавливались при помощи непараметрического критерия Манна–Уитни и Краскела–Уоллиса. Выявление и иллюстрация степени влияния различных факторов на содержание элементов в растениях проводилось при помощи кластерного анализа.

Результаты

Содержание элементов в торфе. Сравнение полученных данных по содержанию элементов в корнеобитаемом слое торфа (в среднем 0–20 см) показало, что на всех постпирогенных участках, по сравнению с ненарушенными, достоверно повышено содержание Zn, Cu, Fe, Mn, P, Cd и Ca (табл. 2), а кроме того, увеличена концентрация Na и Mg (за исключением участка UBF) и Pb (за исключением PF), и только концентрация K значимо не различается между ненарушенным и постпирогенным участками одного болота. Наибольшие последствия пожара, отражающиеся на изменении содержания элементов в торфе, наблюдались на плоскобугристом болоте. В торфе с участка PF достоверно выше концентрация Zn, Fe, Ca, P и Mg, чем на остальных постпирогенных участках.

Кроме пирогенного влияния отмечены региональные различия, наиболее заметные в концентрациях элементов самого верхнего слоя торфа. В образцах торфа (0–10 см), которые отбирались на

повышенных участках микрорельефа, в месте отбора *S. fuscum*, зафиксированы статистически значимые отличия проб с плоскобугристого болота, по сравнению с аналогичными пробами, отобранными на Бакчарском и Усть-Бакчарском болотах. Самые контрастные различия заключаются в низком содержании Na (от 2 до 10 раз), Fe (от 2 до 4 раз) и Pb (от 5 до 20 раз), высокое содержание Mg (от 2,6 до 3,5 раз), P (от 2 до 9 раз), K (1,8 до 7 раз), Ca (от 4 до 10 раз), Mn (от 10 до 40 раз) и Zn (от 1,2 до 5 раз) в пробах торфа, отобранных в лесотундре, по сравнению с пробами с таёжных болот.

Содержание элементов в растениях. Сравнение полученных нами данных по содержанию элементов с ненарушенных и постпирогенных болот показало, что на всех постпирогенных участках в растениях увеличено содержание Zn и Cd (табл. 3). Но в то же время у каждого из рассмотренных нами видов обнаружилось индивидуальные особенности реакции на постпирогенные условия. Образцы хвои *P. sylvestris* с Бакчарского и Усть-Бакчарского болота, отобранные на постпирогенных участках, содержат большую концентрацию Zn, Cd и Cu, чем образцы с ненарушенных участков. В листьях *S. calyculata* на постпирогенных участках, по сравнению с ненарушенными, содержится больше Zn, Cd и Pb. На примере *S. fuscum* различия между ненарушенными и постпирогенными участками проявляются в том, что на постпирогенных участках выше концентрация Zn, Cd и Mn. Содержание элементов P, K, Ca и Fe увеличивается на некоторых постпирогенных участках, а уровень концентрации Na и Mg в растениях не показал зависимости от пирогенной нагрузки (табл. 3).

Таблица 2. Среднее содержание элементов (мг/кг) в верхней части (0–20 см) торфяной залежи

Table 2. Average content of elements (mg/kg) in the upper part (0–20 cm) of the peat deposit

Участок Site	Na	Mg	P	K	Ca	Mn	Fe	Cu	Zn	Cd	Pb
BB	153	479	177	929	1420	98	618	3,8	17	0,1	5,6
	124/178	394/526	156/192	753/1112	1247/1602	73/105	468/720	2,9/4,2	14/22	0,07/0,2	4,3/6,2
BF	456	632	289	960	1978	123	2036	6,7	32	0,33	14,6
	332/541	552/745	201/356	730/1024	1704/2047	98/145	1354/2647	4,2/8,7	29/48	0,25/0,43	11,4/17,6
UBB	292	584	269	928	1574	47	948	3,6	26	0,21	7,3
	271/332	548/611	196/331	774/994	1305/1824	32/58	789/1023	2,9/4,2	22/30	0,19/0,31	6,9/7,8
UBF	311	533	319	937	2524	179	1384	6	34	0,38	10,7
	240/357	471/658	247/495	775/1024	1952/2874	124/195	985/1602	4,4/8,9	28/41	0,3/0,44	8,3/12,4
PB	221	777	401	1463	2354	61	1248	3,4	24	0,15	5,7
	175/231	521/801	297/422	1103/1674	2134/2581	55/93	954/1521	2,9/4	19/26	0,08/0,17	4,2/5,9
PF	315	1825	722	1257	4033	298	5848	6,9	44	0,22	4,3
	273/381	1587/2101	598/967	895/1741	3701/4533	204/352	5181/6234	5,4/7,5	37/48	0,18/0,26	3,6/4,8

Примечание: В верхней строке указано среднее значение, в нижней – минимальное и максимальное значение. Жирным шрифтом выделены значения концентрации, достоверно ($p < 0,005$) различающиеся на ненарушенных и постпирогенных участках одного болотного массива.

Note: Top line shows the mean, the bottom line shows the minimum and maximum values. The concentration values that significantly ($p < 0.005$) differ in pristine and post-pyrogenic sites of the same mire are shown in bold.

Таблица 3. Содержание элементов в ассимиляционных органах растений (мг/кг)

Table 3. Content of elements in assimilation organs of plants (mg/kg)

Вид/Species	Участок/Site	Na	Mg	P	K	Ca	Mn	Fe	Cu	Zn	Cd	Pb
<i>Pinus sylvestris</i>	UBB	32	1347	1021	5019	2763	255	221	4,1	45,9	0,08	0,14
		18/ 36	1298/ 1366	986/ 1064	4762/ 5247	2541/ 2975	247/ 264	209/ 238	3,8/ 4,4	41,8/ 48,3	0,06/ 0,09	0,09/ 0,15
	UBF	25	1331	1204	4621	2904	285	286	12,1	57,5	0,32	0,13
		22/ 28	1294/ 1547	1135/ 1374	4234/ 5437	2712/ 3042	241/ 325	267/ 303	9,8/ 13,7	45,6/ 59,8	0,25/ 0,39	0,09/ 0,17
	BB	24	759	750	1390	2316	480	125	1,0	43,7	0,07	0,19
		21/ 25	746/ 771	734/ 782	1257/ 1412	1978/ 2541	397/ 502	118/ 131	0,77/ 1,54	39,3/ 52,8	0,05/ 0,09	0,03/ 0,52
	BF	27	833	982	4589	2881	480	110	4,6	56,8	0,12	0,16
		24/ 29	708/ 864	924/ 1003	4367/ 4764	2147/ 3201	421/ 514	947/ 124	3,9/ 4,81	46,1/ 59,3	0,08/ 0,18	0,09/ 0,23
<i>Chamaedaphne calyculata</i>	UBB	42	1239	1133	4317	6417	587	91	8,1	24,0	0,19	0,12
		29/ 54	1122/ 1480	1112/ 1154	3857/ 4633	6124/ 6842	554/ 602	88/ 93	7,8/ 8,4	22/ 27	0,17/ 0,22	0,09/ 0,16
	UBF	52	1340	1115	3688	7974	1925	169	6,0	38,4	0,26	0,26
		48/ 57	1167/ 1397	987/ 1257	2687/ 4182	6542/ 8153	1811/ 2136	144/ 182	4,3/ 8,2	36,4/ 40,2	0,22/ 0,32	0,22/ 0,28
	PB	291	1029	160	3252	1536	108	667	3,1	23,4	0,09	2,31
		277/ 312	984/ 1201	149/ 173	2745/ 3812	1487/ 1752	96/ 112	650/ 702	1,98/ 3,77	19,7/ 28,5	0,07/ 0,1	1,98/ 2,45
	PF	304	1174	382	3961	1672	104	992	7,9	38,6	0,28	3,28
		287/ 335	1014/ 1230	284/ 410	3863/ 4024	1305/ 1702	96/ 112	954/ 1024	6,3/ 8,2	33,9/ 42,3	0,22/ 0,31	2,99/ 4,11
	BB	35	1152	726	3134	6110	1803	887	5,1	19,3	0,05	0,16
		26/ 46	1045/ 1455	657/ 824	2947/ 3336	5457/ 7632	1788/ 1956	752/ 963	4,3/ 6,4	17,4/ 22,8	0,04/ 0,06	0,12/ 0,18
	BF	43	1267	764	3481	6866	1694	790	7,6	28,0	0,13	0,3
		36/ 57	1025/ 1352	653/ 781	3254/ 3722	5963/ 7213	1496/ 1723	685/ 805	4,9/ 8,2	19,6/ 31	0,11/ 0,15	0,24/ 0,38
<i>Sphagnum fuscum</i>	UBB	265	552	256	4579	985	58	395	4,1	14,0	0,16	2,22
		233/ 302	457/ 782	168/ 324	3147/ 5234	875/ 1245	45/ 62	314/ 452	3,5/ 4,5	12,2/ 16,5	0,1/ 0,22	1,96/ 2,82
	UBF	313	570	455	3941	1454	130	690	6,0	29,3	0,24	2,45
		268/ 367	481/ 653	354/ 602	3334/ 4214	1245/ 1634	102/ 147	457/ 724	4,2/ 7,3	23,1/ 35,2	0,18/ 0,28	1,78/ 3,33
	PB	304	1280	508	3012	1988	117	303	4,0	24,7	0,01	1,27
		274/ 343	1123/ 1455	435/ 654	2654/ 3245	1885/ 2147	97/ 134	242/ 485	3,3/ 5,2	21,3/ 27,5	0,008/ 0,02	0,85/ 1,68
	PF	313	1353	512	3946	2005	352	269	3,0	29,6	0,04	1,02
		295/ 335	1165/ 1400	397/ 775	3245/ 4120	1547/ 2024	299/ 412	221/ 302	1,6/ 4,4	21,4/ 33,6	0,02/ 0,05	0,92/ 2,02
	BB	329	594	362	3066	1600	208	500	6,5	14,0	0,05	2,90
		285/ 514	423/ 634	297/ 512	2702/ 4521	1545/ 2135	105/ 312	474/ 823	4,8/ 7,3	11,3/ 16,5	0,03/ 0,06	1,57/ 3,14
	BF	242	649	359	4484	1785	312	473	15,1	19,3	0,12	2,05
		233/ 251	501/ 697	244/ 475	4142/ 4484	1347/ 2023	293/ 424	429/ 517	14,3/ 25,3	14,7/ 23,9	0,1/ 0,14	1,73/ 2,56

Примечание: В верхней строке указана медиана, в нижней – минимальное/максимальное значение. Жирным шрифтом выделены значения концентрации, достоверно ($p<0,005$) различающиеся на ненарушенных и постпирогенных участках одного болотного массива.

Note: Top line shows the median, the bottom line shows the minimum/maximum values. The concentration values that differ significantly ($p<0.005$) in pristine and post-pyrogenic sites of the same mire are shown in bold.

Анализ концентрации элементов в растениях по данным со всех исследованных участков показал, что наибольшие различия наблюдаются между видами растений и менее значимые – между регионами и участками. Региональные особенности выражаются главным образом в отличии наиболее удалённых северных участков PB и PF. На плоскобугристом болоте *C. calyculata* содержат достоверно

больше Pb (от 8 до 27 раз), Na (от 5 до 26 раз) и меньше Mn (от 5 до 115 раз), Ca (от 4 до 5 раз), K (от 3 до 6 раз), P (от 2 до 7 раз), чем на Бакчарском и Усть-Бакчарском болотах. В *S. fuscum*, произрастающем на плоскобугристом болоте, более высокая концентрация Mg (от 1,7 до 3 раз), чем во мхе других болот, но меньше Cd (от 1,5 до 44 раз) и Pb (от 1,7 до 2,8 раз).

Сравнение всех полученных нами данных по содержанию элементов в растениях показало, что наибольшие различия прослеживаются по данному признаку между растениями разных видов. Межвидовая разнородность по соотношению концентрации элементов в растениях хорошо иллюстрируется результатами кластерного анализа (рис. 2). Кластеры разделяются в основном по видовому признаку. Так, видовые различия в концентрации элементов наиболее выражены в относительно высоком содержании в тканях *S. fuscum* Na, Pb и Fe, и низком содержании Ca и P, характерном для растений, отобранных на всех участках. *P. sylvestris* содержит больше Zn и меньше Fe, чем у других видов. В листьях *C. calyculata* обнаружена более высокая концентрация Mn и более низкая концентрация Pb, чем в тканях других видов. Поэтому для отслеживания особенностей пирогенного влияния необходимо учитывать различные способности видов поглощать элементы, используя биогеохимические коэффициенты.

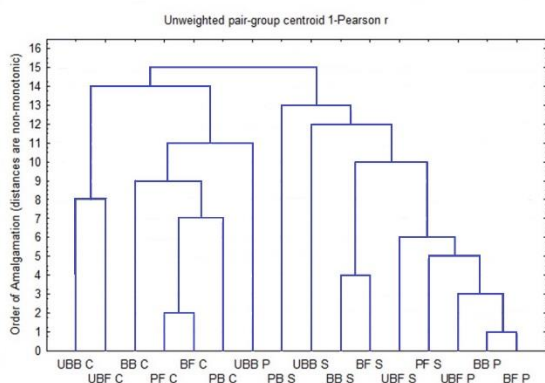


Рис. 2. Результаты кластерного анализа содержания элементов в растениях (C – *C. calyculata*; P – *P. sylvestris*; S – *S. fuscum*) с исследованных участков (BB – фоновый участок Бакчарского болота; BF – постпирогенный участок Бакчарского болота; UBB – фоновый участок Усть-Бакчарского болота; UBF – постпирогенный участок Усть-Бакчарского болота; PB – фоновый участок плоскобугристого болота; PF – постпирогенный участок плоскобугристого болота)

Fig. 2. Results of cluster analysis of the content of elements in plants (C – *C. calyculata*; P – *P. sylvestris*; S – *S. fuscum*) from the studied sites (BB – pristine site of the Bakchar bog; BF – post-pyrogenic site of the Bakchar bog; UBB – pristine area of the Ust-Bakchar bog; UBF – post-pyrogenic site of the Ust-Bakchar bog; PB – pristine site of Palsa; PF – post-pyrogenic site of Palsa)

Зольность растений и коэффициенты биологического поглощения. Прошедшие на болотах пожары оказали влияние на зольность растений, произрастающих на постпирогенных участках. Зольность

всех рассмотренных нами видов растений увеличена на большинстве постпирогенных участках (рис. 2) и коррелирует с концентрацией Ca ($r_s=0,73$; при $p<0,05$) и Mg ($r_s=0,67$; при $p<0,05$). Сравнение образцов разных видов между собой показало, что наибольшая зольность наблюдается у *C. calyculata*, а наименьшая у *S. fuscum*.

Сравнение величины КБП показало, что для всех рассмотренных видов на постпирогенных участках увеличивается КБП Cd. Наибольшее увеличение данного показателя происходит на постпирогенном участке Усть-Бакчарского болота, где КБП Cd для *P. sylvestris* увеличивается в 4 раза, для *C. calyculata* – в 1,4 раза, а для *S. fuscum* – в 3 раза. Кроме того, на постпирогенных участках снижается КБП Mn у сосудистых растений. Так, для *P. sylvestris* КБП Mn ниже на пострадавшем от пожара участке BF почти в 2 раза, чем на ненарушенном BB, на UBF почти в 4 раза ниже, чем на UBB, а для *C. calyculata* уровень КБП Mn ниже на постпирогенных участках от 1,5 до 3 раз, чем на ненарушенных. Помимо снижения на всех постпирогенных участках КБП Mn, статистически достоверное снижение КБП P, Mg и Ca для *C. calyculata* наблюдается на плоскобугристом болоте, по сравнению с Бакчарским и Усть-Бакчарским болотом. Сравнение разных видов показало, что особенно высокий показатель КБП Mn отмечен для *C. calyculata*, а самый низкий характерен для *S. fuscum* на всех участках (рис. 3).

Обсуждение

Природные пожары на болотах приводят к изменению содержания некоторых элементов в торфе. Наше исследование показало увеличенное содержание Zn, Cu, Fe, Mn, P, Cd и Ca в верхнем слое торфа спустя 6–8 лет после пожара. Подобное увеличение содержания элементов в почве отмечено в первые годы после пожара исследованиями авторов в разных регионах. Так, после выгорания торфа на болоте и после поверхностного лесного пожара в почве наблюдались повышение концентрации Ca, Fe, P, Cd и Zn [29–31]. Высокие концентрации элементов в торфе на постпирогенном участке плоскобугристого болота, по сравнению с болотами таёжной зоны, объясняются совокупностью местных условий. Природные пожары оказывают особенно сильное влияние на биогеохимические процессы в зоне вечной мерзлоты, что продолжает сказываться в последующие годы на изменении круговорота питательных веществ [3]. Наибольшее отмеченное нами отличие болот лесотундровой зоны выражается в накоплении P в торфе плоскобугристого болота и является закономерным показателем изменения таких климатических параметров, как температура и влажность [32–34].

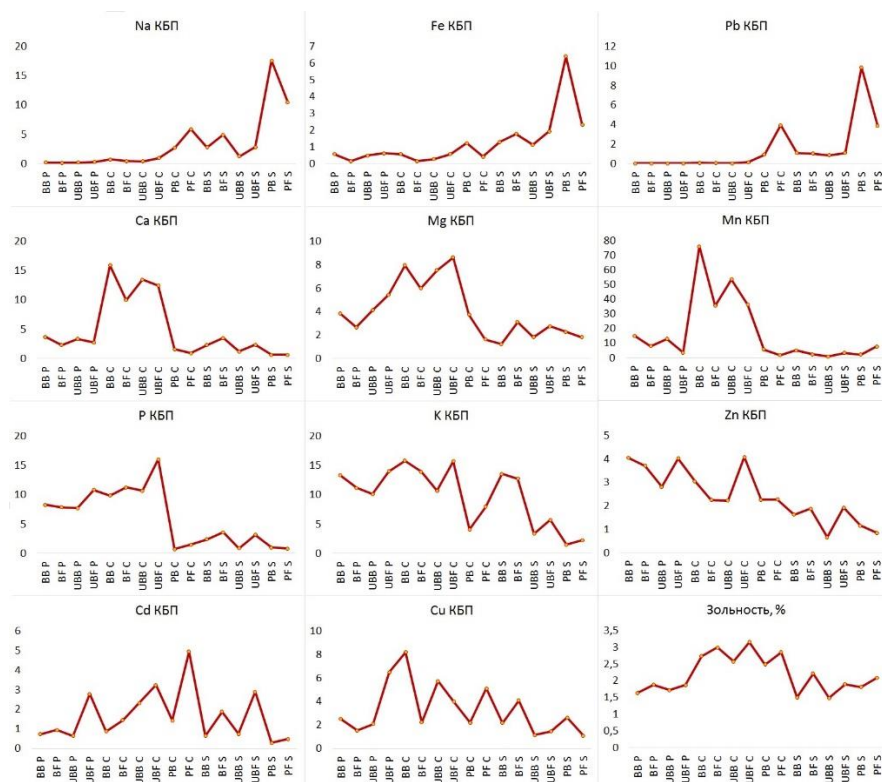


Рис. 3. Сравнение зольности растений и КБП с исследованных участков (BB – фоновый участок Бакчарского болота; BF – постпирогенный участок Бакчарского болота; UBB – фоновый участок Усть-Бакчарского болота; UBF – постпирогенный участок Усть-Бакчарского болота; PB – фоновый участок плоскобугристого болота; PF – постпирогенный участок плоскобугристого болота (C – *C. calyculata*; P – *P. sylvestris*; S – *S. fuscum*))

Fig. 3. Comparison of ash content of plants and biological absorption coefficients (BAC) from the studied sites (C – *C. calyculata*; P – *P. sylvestris*; S – *S. fuscum*) from the studied sites (BB – pristine site of the Bakchar bog; BF – post-pyrogenic site of the Bakchar bog; UBB – pristine site of the Ust-Bakchar bog; UBF – post-pyrogenic site of the Ust-Bakchar bog; PB – pristine site of Palsa; PF – post-pyrogenic site of Palsa))

Высокие концентрации соединений фосфора в торфе лесотундры, по сравнению с тайгой, вероятно, вызваны более медленной минерализацией P при низких температурах [25, 32]. Пониженная минерализация P объясняет и наши результаты по уменьшению уровня КБП P у всех видов на более северных участках PB и PF. Кроме того, увеличение содержания некоторых элементов в верхних слоях торфа плоскобугристого болота может быть вызвано общим загрязнением района исследования выбросами предприятий нефтегазодобывающей промышленности [35–38].

Обнаруженное нами увеличение содержания Cd и Zn в ассимиляционных органах растений постпирогенных участков, по сравнению с ненарушенными, свидетельствует об изменении формы нахождения данных элементов в торфе в результате пожара. Изменение доступности элементов в торфе после пожара обуславливается изменением структуры химических элементов в деятельном слое или их перемещением, в разной степени затрагивающие разные элементы [39, 40]. Рост КБП Cd, помимо увеличения доступности данного элемента для растений на постпирогенных

участках, может свидетельствовать о повышении концентраций данного элемента в составе атмосферных выпадений. В первые годы после пожара на постпирогенных участках резко возрастает концентрация тяжёлых металлов в аэрозольных выпадениях [41]. Высокое содержание Mn, зафиксированное нами в листьях *C. calyculata*, отмечалось ранее для этого вида и других вересковых кустарничков [25, 42, 43], что, вероятно, можно считать их систематической особенностью. Снижение КБП Mn на постпирогенных участках и особенно на плоскобугристом болоте, на фоне повышенного содержания Mn в торфе данных участков, может объясняться антагонистическим взаимодействием Mn с большинством элементов, содержание которых повышено в торфе данных участков [38, 44]. Подобное снижение концентрации Mn в растениях, при увеличении его в почве после пожара, отмечено ранее [45]. Способность мохообразных к накоплению некоторых элементов широко известна и используется для биоиндикации. Более высокое, чем у других видов, содержание Pb в тканях *S. fuscum*, обнаруженное нами на всех исследованных участках, объясняется отсутствием у мохообразных барьерных механизмов к по-

глощению Pb и отмечается многими авторами [17, 46, 47]. Кроме того, как и в наших пробах, исследователями [25] отмечается более низкое, по сравнению с сосудистыми растениями, накопление в сфагнуме Ca и P. Таким образом, произошедшие во время пожара изменения биогеохимических условий зависят от множества параметров, таких как климатические особенности, температура и тип пожара, влажность субстрата, форма нахождения элементов в различных типах биогеоценоза [48].

Заключение

В результате проведённого исследования можно сделать вывод, что спустя 6–8 лет после пожара сохраняются постпирогенные изменения биогеохимических показателей функционирования экосистемы. Для верхнего слоя торфа постпирогенных участков болот обнаружено повышенное содержание всех рассмотренных элементов, кроме K. Элементный состав растений показал зависимость в первую очередь от видовой принадлежности, и в меньшей мере от условий произрастания. Тем не менее для всех исследованных видов растений с постпирогенных участков характерно увеличение концентрации Zn и Cd в ассимиляционных органах.

Кроме того, у рассмотренных нами видов на постпирогенных участках, по сравнению с ненарушенными, увеличена интенсивность поглощения Cd и уменьшена интенсивность поглощения Mn. Наряду с постпирогенными изменениями установлены межвидовые и региональные биогеохимические особенности. Установлены элементы, коэффициент биологического поглощения которых наиболее высок, независимо от пирогенной нагрузки. Для *S. fuscum* такими элементами оказались Pb, Fe, Na; для *C. calyculata* – Mn и P, для *P. sylvestris* – Zn, K и P. Региональные различия заключаются в том, что исследованные нами растения, произрастающие в лесотундре, по сравнению с таёжными, в среднем содержат больше Na и Pb и меньше Ca, Mn, K, P. Верхний слой торфа плоскобугристого болота отличается высоким содержанием P. Наше исследование показало, что постпирогенная трансформация затрагивает химический состав торфа и растений, видоспецифична, зависит от региональных геохимических условий. В целях подробного изучения результатов подобной трансформации необходим дальнейший мониторинг состояния постпирогенных болот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bond W.J., Keeley J.E. Fire as a global 'herbivore': the ecology and evolution of flammable ecosystems // Trends in Ecology & Evolution. – 2005. – Vol. 20 – № 7. – P. 387–394. DOI: 10.1016/j.tree.2005.04.025.
2. Recovering of soil organic matter and associated C and N pools on regenerated forest ecosystems at different tree species influence on post-fire and reclaimed mine sites / B. Woś, A. Józefowska, M. Chodak, M. Pietrzykowski // Geoderma Regional. – 2023. – Vol. 33 – P. e00632. DOI: 10.1016/j.geodrs.2023.e00632.
3. Influences of forest fires on the permafrost environment: a review / X.Y. Li, H.J. Jin, H.W. Wang, W. Shan, D.L. Luo, R.X. He, Y.D. Huang, S.S. Marchenko, V. Spektor, N. Jia // Advances in Climate Change Research. – 2021. – Vol. 12. – № 1. – P. 48–65. DOI: 10.1016/j.accre.2021.01.001.
4. Chungu D., Ng'andwe P., Mubanga H. Fire alters the availability of soil nutrients and accelerates growth of Eucalyptus grandis in Zambia // Journal of Forestry Research. – 2020. – Vol. 31. – № 5 – P. 1637–1645. DOI: 10.1007/s11676-019-00977-y.
5. Fire effects on the distribution and bioavailability of potentially toxic elements (PTEs) in agricultural soils / R. Terzano, I. Rascio, I. Allegratta, C. Porfido, M. Spagnuolo, M.Y. Khanghahi, C. Crecchio, F. Sakellariadou, C.E. Gattullo // Chemosphere. – 2021. – Vol. 281. – P. 130752. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.130752.
6. Харанжевская Ю.А., Сinyutkina A.A. Динамика химического состава вод постпирогенных болот в условиях лесотундры и тайги Западной Сибири. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 6. – С. 193–203. DOI: 10.18799/24131830/2023/6/4042.
7. Sporadic Pb accumulation by plants: Influence of soil biogeochemistry, microbial community and physiological mechanisms / X. Liu, Y. Ju, S. Mandzhieva, D. Pinskiy, T. Minkina, V.D. Rajput, T. Roane, S. Huang, Y. Li, L.Q. Ma, S. Clemens, C. Rensing // Journal of Hazardous Materials. – 2023. – Vol. 444 (A). – P. 130391. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.130391.
8. Accumulation and distribution of nutrients, radionuclides and metals by roots, stems and leaves of plants / H.T. Phuong, V.N. Ba, B.N. Thien, L.T.T. Hong // Nuclear Engineering and Technology. – 2023. – Vol. 55. – № 7. – P. 2650–2655. DOI: 10.1016/j.net.2023.03.039.
9. Carini F., Bengtsson G. Post-deposition transport of radionuclides in fruit. Journal of Environmental Radioactivity. – 2001. – Vol. 52. – № 2–3. – P. 215–236. DOI: 10.1016/S0265-931X(00)00034-5.
10. Evaluation of heavy metal speciation distribution in soil and the accumulation characteristics in wild plants: a study on naturally aged abandoned farmland adjacent to tailings / S. Dong, L. Li, W. Chen, Z. Chen, Yu. Wang, S. Wang // Science of the Total Environment. – 2024. – Vol. 917. – P. 170594. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170594.
11. Bonanno G., Vymazal J., Cirelli G.L. Translocation, accumulation and bioindication of trace elements in wetland plants // Science of The Total Environment. – 2018. – Vol. 631–632. – P. 252–261. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.039.
12. Estimation of the soil to plant transfer factor and the annual organ equivalent dose due to ingestion of food crops in Ho Chi Minh city, Vietnam / B.N. Thien, V.N. Ba, N.T.T. Vy, L.T.T. Hong // Chemosphere. – 2020. – Vol. 259. – P. 127432. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127432.
13. Fernández-Martínez M. From atoms to ecosystems: elementome diversity meets ecosystem functioning // New Phytologist. – 2022. – Vol. 234 – P. 35–42. DOI: 10.1111/nph.17864.

14. Community biomass accumulation benefits from flexible plant nutrient homeostasis after wildfire / Z. Song, H. Liu, X. Wang, L. Shi, L. Wu, J. Cao, J. Dai // *Forest Ecology and Management*. – 2023. – Vol. 535 – P. 120894. DOI: 10.1016/j.foreco.2023.120894.
15. Московченко Д.В., Моисеева И.Н., Хозяинова Н.В. Элементный состав растений Уренгойских тундр // *Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения*. – 2012. – Т. 12 – С. 130–136.
16. Bashkin V.N. Natural biogeochemical cycling in polar ecosystems // *Biogeochemical technologies for managing pollution in polar ecosystems* / Ed. by V.N. Bashkin. – Switzerland: Springer International Publ., 2017. – P. 7–18. DOI: 10.1007/978-3-319-41805-6.
17. Contents of macro-, microelements and long-lived radionuclides in the medicinal plants belonging to the wetland community of Siberian region, Russia / N.K. Ryzhakova, L.G. Babeshina, A.G. Kondratyeva, D.Y. Sechnaya // *Phytochemistry Letters*. – 2017. – Vol. 22. – P. 280–286. DOI: 10.1016/j.phytol.2017.10.001.
18. Accumulation of trace elements in sediments and macrophytes of thermokarst lakes in Western Siberia / R.M. Manasypov, O.S. Pokrovsky, L.S. Shirokova, S.N. Kirpotin, N.S. Zinner // *Biogeochemistry of trace elements* / Eds. O.S. Pokrovsky, J. Viers. – New York, Nova Science Publishers, 2018. – P. 81–112.
19. Biogeochemical features of Holocene sediments in oligotrophic bogs of the Baraba forest steppe / G.A. Leonova, A.E. Maltsev, L.V. Miroshnichenko, A.S. Shavekin, M.V. Rubanov, Y.I. Preis // *Geochemistry International*. – 2022. – Vol. 60. – № 2. – P. 183–202. DOI: 10.1134/S0016702922020069.
20. Veretennikova E.E. Lead in the natural peat cores of ridge-hollow complex in the taiga zone of West Siberia // *Ecological Engineering*. – 2015. – Vol. 80. – P. 100–107. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2015.02.001.
21. Elemental composition of peat profiles in western Siberia: Effect of the micro-landscape, latitude position and permafrost coverage / V.A. Stepanova, O.S. Pokrovsky, J. Viers N.P. Mironycheva-Tokareva, N.P. Kosykh, E.K. Vishnyakova // *Applied Geochemistry*. – 2015. – Vol. 53. – P. 53–70. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2014.12.004.
22. Holocene paleoenvironmental changes reflected in peat and lake sediment records of Western Siberia: geochemical and plant macrofossil proxies / N.E. Ryabogina, A.S. Afonin, S.N. Ivanov, H. Li, P. Kalinin, S. Udaltsov, S.A. Nikolaenko // *Quaternary International*. – 2019. – Vol. 528. – P. 73–87. DOI: 10.1016/j.quaint.2019.04.006.
23. Malikova I.N., Strakhovenko V.D., Shcherbov B.L. Distribution of radionuclides in moss-lichen cover and needles on the same grounds of landscape-climatic zones of Siberia // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2019. – Vol. 198. – P. 64–78. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2018.12.013.
24. Geochemical barriers in oligotrophic peat bog (Western Siberia) / O. Savichev, M. Rudmin, A. Mazurov, E. Soldatova // *Applied Geochemistry*. – 2020. – Vol. 113. – P. 104519. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.104519.
25. Московченко Д.В., Романенко Е.А. Биогеохимические особенности ландшафтов Надымского района ЯНАО // *Вестник Нижневартовского государственного университета*. – 2022. – Т. 4. – № 60. – С. 122–136. DOI: 10.36906/2311-4444/22-4/12.
26. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение / О.Л. Лисс, Л.И. Абрамова, Н.А. Аветов, Н.А. Березина, Л.И. Инишева, Т.В. Курнишкова, З.А. Слукa, Т.Ю. Толпышева, Н.К. Шведчикова / под ред. В.Б. Куваева. – Тула: Гриф и К°, 2001. – 584 с.
27. Синюткина А.А., Гашкова Л.П., Харанжевская Ю.А. Пирогенное изменение болотной растительности и торфа в Западной Сибири // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. – 2024. – Т. 1. – С. 78–88. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.6.
28. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. – М.: Высшая школа, 1966. – 391 с.
29. Бадмажапова И.А., Гынинова А.Б., Гончиков Б.М.Н. Постпирогенное развитие и защита от пожаров болотных почв // *Мелиорация и водное хозяйство*. – 2019. – № 2. – С. 34–40.
30. Chebykina E., Abakumov E., Estimation of heavy metals content and regularities of its migration within a soil profile during pyrogenic soil formation in the context of the Scotch pine forest in Togljatty city // *Folia Oecologica*. – 2023. – Vol. 50. – № 2. – P. 159–164. DOI: 10.2478/foecol-2023-0014.
31. Свойства пирогенных торфяных эутрофных почв болота Таган (юг Томской области) / О.А. Голубина, В.А. Горельский, К.Н. Жильцов, А.О. Лайком // *Вестник Томского государственного университета*. – 2015. – № 391. – С. 232–237. DOI: 10.17223/15617793/391/37.
32. Greenland ice cores constrain glacial atmospheric fluxes of phosphorus / H.A. Kjær, R. Dallmayr, J. Gabrieli, K. Goto-Azuma, M. Hirabayashi, A. Svensson, P. Vallenga // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2015. – Vol. 120. – P. 10,810–10,822. DOI: 10.1002/2015JD023559.
33. Effects of climate on soil phosphorus cycle and availability in natural terrestrial ecosystems / E. Hou, C. Chen, Y. Luo, G. Zhou, Yu. Kuang, Yu. Zhang, M. Heenan, X. Lu, D. Wen // *Glob Chang Biol*. – 2018. – Vol. 24. – № 8. – P. 3344–3356. DOI: 10.1111/gcb.14093.
34. Palaeoenvironmental changes in the Iberian central system during the Late-glacial and Holocene as inferred from geochemical data: A case study of the Navamño depression in western Spain / V. Turu, R.M. Carrasco, J.A. López-Sáez, X. Pontevedra-Pombal // *Catena*. – 2021. – Vol. 207 – P. 105689. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105689.
35. Предпосылки техногенной метаморфизации ионного состава воды р. Надым в условиях глобальных климатических изменений / А.О. Даниленко, Л.С. Косменко, О.С. Решетняк, М.Ю. Кондакова // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. – 2020. – № 1. – С. 127–137. DOI: 10.31857/S2587556620010069.
36. Пространственно-временная изменчивость гидрохимических показателей водной среды Обской и Тазовской губ / М.В. Третьяков, Е.В. Румянцев, В.А. Брызгалов, А.А. Пискун, И.И. Василевич // *Арктика: экология и экономика*. – 2022. – Т. 12. – № 1. – С. 46–57. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-1-46-57.
37. Пожитков Р.Ю., Московченко Д.В., Тигеев А.А. Элементный состав торфяных отложений верхового типа Пур-Тазовского междуречья // *Географический вестник*. – 2020. – № 1. – Т. 52. – С. 154–165. DOI: 10.17072/2079-7877-2020-1-154-165.

38. Фоновое содержание химических элементов в растениях севера Западной Сибири и его изменение под влиянием нефтегазодобычи / М.Г. Опекунова, А.Ю. Опекунов, С.Ю. Кукушкин, И.Ю. Арестова, С.А. Лисенков // Сибирский экологический журнал. – 2024. – Т. 31. – № 2. – С. 359–372. DOI: 10.15372/SEJ20240214.
39. The influence of parent material on vegetation response 15 years after the dude fire, Arizona / J.M. Leonard, A.L. Medina, D.G. Neary, A. Tecle // Forests. – 2015. – Vol. 6. – P. 613–635. DOI: 10.3390/f6030613.
40. Effects of fire regime on nitrogen distribution in marshlands of the Sanjiang Plain (NE China) / S. Ji, H. Zhao, G. Wang, J. Cong, G. Li, D. Han, C. Gao // Fire. – 2024. – Vol. 7. – № 10. – P. 339. DOI: 10.3390/fire7100339.
41. 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 исследования. – 2019. – № 4. – С. 62–73. DOI: 10.17223/25421379/13/6.
42. Робакидзе Е.А., Бобкова К.С., Наймушина С.И. Элементный состав доминирующих видов растений в среднетаежных сосняках разного возраста (на примере Республики Коми) // Растительные ресурсы. – 2020. – Т. 56. – № 1. – С. 53–65. DOI: 10.31857/S0033994620010045.
43. Болдырева Е.А. Компонентный состав кормовых растений и лишайников оленьих пастбищ Надымского района (Ямало-Ненецкий автономный округ) // Растительные ресурсы. – 2023. – Т. 59. – № 1. – С. 54–64. DOI: 10.31857/S0033994623010041.
44. Алексеева-Попова Н.В., Дроздова И.В. Микроэлементный состав растений Полярного Урала в контрастных геохимических условиях // Экология. – 2013. – № 2. – С. 90. DOI: 10.7868/S0367059713020030.
45. Журкова И.С. Влияние низового пожара на перераспределение химических элементов // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2014. – № S3-2. – С. 11–13.
46. Пристова Т.А., Загирова С.В. Элементный состав растений в предгорных лесах Приполярного Урала Республики Коми // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2018. – Т. 20. – № 2. – С. 142–146.
47. Impact of the 2016 Fort McMurray wildfires on atmospheric deposition of polycyclic aromatic hydrocarbons and trace elements to surrounding ombrotrophic bogs / Y. Zhang, R. Pelletier, T. Noernberg, M.W. Donner, I. Grant-Weaver, J.W. Martin, W. William Shotyk // Environment International. – 2022. – Vol. 158. – P. 106910. DOI: 10.1016/j.envint.2021.106910.
48. Журкова И.С., Щербов Б.Л. Миграция химических элементов при лесном низовом пожаре (Алтайский край) // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». – 2016. – Т. 16. – С. 30–41.

Информация об авторах

Людмила Павловна Гашкова, кандидат географических наук, старший научный сотрудник Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа – филиала Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН, Россия, 634050, г. Томск, ул. Гагарина, 3; Gashkova-lp@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6159-8294>

Анна Алексеевна Синюткина, кандидат географических наук, старший научный сотрудник Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа – филиала Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН, Россия, 634050, г. Томск, ул. Гагарина, 3; Ankalaeva@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0004-1283-0797>

Поступила в редакцию: 10.12.2024

Поступила после рецензирования: 17.12.2024

Принята к публикации: 04.09.2025

REFERENCES

1. Bond W.J., Keeley J.E. Fire as a global ‘herbivore’: the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005, vol. 20, no. 7, pp. 387–394. DOI: 10.1016/j.tree.2005.04.025.
2. Woś B., Józefowska A., Chodak M., Pietrzykowski M. Recovering of soil organic matter and associated C and N pools on regenerated forest ecosystems at different tree species influence on post-fire and reclaimed mine sites. *Geoderma Regional*, 2023, vol. 33, pp. e00632. DOI: 10.1016/j.geodrs.2023.e00632.
3. Li X.Y., Jin H.J., Wang H.W., Shan W., Luo D.L., He R.X., Huang Y.D., Marchenko S.S., Spektor V., Jia N. Influences of forest fires on the permafrost environment: A review. *Advances in Climate Change Research*, 2021, vol. 12, no. 1, pp. 48–65. DOI: 10.1016/j.accre.2021.01.001.
4. Chungu, D., Ng’andwe, P., Mubanga, H. Fire alters the availability of soil nutrients and accelerates growth of *Eucalyptus grandis* in Zambia. *Journal of Forestry Research*, 2020, vol. 31, pp. 1637–1645. DOI: 10.1007/s11676-019-00977-y.
5. Terzano R., Rascio I., Allegratta I., Porfido C., Spagnuolo M., Khanghahi M.Y., Crecchio C., Sakellariadou F., Gattullo C.E. Fire effects on the distribution and bioavailability of potentially toxic elements (PTEs) in agricultural soils, *Chemosphere*, 2021, vol. 281, pp. 130752. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.130752.
6. Kharanzhevskaya Yu.A., Sinyutkina A.A. Dynamics of the chemical composition of waters of post-pyrogenic swamps in the forest-tundra and taiga conditions of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 6, pp. 193–203. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/6/4042.
7. Liu X., Ju Y., Mandzhieva S., Pinski D., Minkina T., Rajput V.D., Roane T., Huang S., Li Y., Ma L.Q., Clemens S., Rensing C. Sporadic Pb accumulation by plants: Influence of soil biogeochemistry, microbial community and physiological mechanisms. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, vol. 444(A), pp. 130391. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.130391.
8. Phuong H.T., Ba V.N., Thien B.N., Hong L.T.T. Accumulation and distribution of nutrients, radionuclides and metals by roots, stems and leaves of plants. *Nuclear Engineering and Technology*, 2023, vol. 55, no.7, pp. 2650–2655. DOI: 10.1016/j.net.2023.03.039.

9. Carini F., Bengtsson G., Post-deposition transport of radionuclides in fruit. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2001, vol. 52, no. 2–3, pp. 215–236. DOI: 10.1016/S0265-931X(00)00034-5.
10. Dong S., Li L., Chen W., Chen Z., Wang Yu., Wang S. Evaluation of heavy metal speciation distribution in soil and the accumulation characteristics in wild plants: A study on naturally aged abandoned farmland adjacent to tailings. *Science of The Total Environment*, 2024, vol. 917, pp. 170594. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170594.
11. Bonanno G., Vymazal J., Cirelli G.L. Translocation, accumulation and bioindication of trace elements in wetland plants. *Science of The Total Environment*, 2018, vol. 631–632, pp. 252–261. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.039.
12. Thien B.N., Ba V.N., Vy N.T.T., Hong L.T.T. Estimation of the soil to plant transfer factor and the annual organ equivalent dose due to ingestion of food crops in Ho Chi Minh city, Vietnam. *Chemosphere*, 2020, vol. 259, pp. 127432. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127432.
13. Fernández-Martínez M. From atoms to ecosystems: elementome diversity meets ecosystem functioning. *New Phytologist*, 2022, vol. 234, pp. 35–42. DOI: 10.1111/nph.17864.
14. Song Z., Liu H., Wang X., Shi L., Wu L., Cao J., Dai J. Community biomass accumulation benefits from flexible plant nutrient homeostasis after wildfire. *Forest Ecology and Management*, vol. 2023535, pp. 120894. DOI: 10.1016/j.foreco.2023.120894.
15. Moskovchenko D.V., Moiseeva I.N., Hozjainova N.V. Microelement composition of plants from Urengoy tundras. *Bulletin of ecology, forestry and landscape science*, 2012, vol. 12, pp. 130–136. (In Russ.)
16. Bashkin, V.N. Natural Biogeochemical cycling in polar ecosystems. *Biogeochemical technologies for managing pollution in polar ecosystems*. Ed. V.N. Bashkin. Switzerland, Springer International Publishing, 2017. pp. 7–18. DOI: 10.1007/978-3-319-41805-6.
17. Ryzhakova N.K., Babeshina L.G., Kondratyeva A.G., Sechnaya D.Y. Contents of macro-, microelements and long-lived radionuclides in the medicinal plants belonging to the wetland community of Siberian region, Russia. *Phytochemistry Letters*, 2017, vol. 22, pp. 280–286. DOI: 10.1016/j.phytol.2017.10.001.
18. Manasypov R.M., Pokrovsky O.S., Shirokova L.S. Kirpotin S.N., Zinner N.S. () Accumulation of trace elements in sediments and macrophytes of thermokarst lakes in Western Siberia. *Biogeochemistry of trace elements*. Eds. O.S. Pokrovsky, J. Viers. New York, Nova Science Publishers, 2018. pp. 81–112.
19. Leonova G.A., Maltsev A.E., Miroshnichenko L.V., Shavekin A.S., Rubanov M.V., Preis Y.I. Biogeochemical features of holocene sediments in oligotrophic bogs of the Baraba forest steppe. *Geochemistry International*, 2022, vol. 60, no. 2, pp. 183–202. DOI: 10.1134/S0016702922020069
20. Veretennikova E.E. Lead in the natural peat cores of ridge-hollow complex in the taiga zone of West Siberia. *Ecological Engineering*, 2015, vol. 80, pp. 100–107. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2015.02.001.
21. Stepanova V.A., Pokrovsky O.S., Viers J., Mironycheva-Tokareva N.P., Kosykh N.P., Vishnyakova E.K. Elemental composition of peat profiles in western Siberia: Effect of the micro-landscape, latitude position and permafrost coverage. *Applied Geochemistry*, 2015, vol. 53, pp. 53–70. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2014.12.004.
22. Ryabogina N.E., Afonin A.S., Ivanov S.N., Li H., Kalinin P., Udaltsov S., Nikolaenko S.A. Holocene paleoenvironmental changes reflected in peat and lake sediment records of Western Siberia: Geochemical and plant macrofossil proxies. *Quaternary International*, 2019, vol. 528, pp. 73–87. DOI: 10.1016/j.quaint.2019.04.006.
23. Malikova I.N., Strakhovenko V.D., Shcherbov B.L. Distribution of radionuclides in moss-lichen cover and needles on the same grounds of landscape-climatic zones of Siberia. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2019, vol. 198, pp. 64–78. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2018.12.013.
24. Savichev O., Rudmin M., Mazurov A., Soldatova E. Geochemical barriers in oligotrophic peat bog (Western Siberia). *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 113, pp. 104519. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.104519.
25. Moskovchenko D.V., Romanenko E.A. Biogeochemical features of landscapes of the Nadya region of YaNAO. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 2022, vol. 4, no. 60, pp. 122–136. (In Russ.) DOI: 10.36906/2311-4444/22-4/12.
26. Liss O.L., Abramova L.I., Avetov N.A. *Bog of Western Siberia and their conservation value*. Tula, Grif i K° Publ., 2001. 584 p. (In Russ.)
27. Sinyutkina A.A., Gashkova L.P., Kharanzhevskaya Yu.A. Pyrogenic changes of bog vegetation and peat in Western Siberia. *Lomonosov Geography Journal*, 2024, vol. 1, pp. 78–88. (In Russ.). DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.6.
28. Perelman A.I. *Landscape geochemistry*. Moscow. Vysshaya shkola, 1966. 391 p. (in Russ.)
29. Badmazhapova I.A., Gyninova A.B., B.M.N. Gonchikov. Postpyrogenic development and fire protection of bog soils // *Melioration and Water Management*, 2019, no. 2, pp. 34–40. (In Russ.)
30. Chebykina E., Abakumov E. Estimation of heavy metals content and regularities of its migration within a soil profile during pyrogenic soil formation in the context of the Scotch pine forest in Togljatty city. *Folia Oecologica*, 2023, vol. 50, no. 2, pp. 159–164. DOI: 10.2478/foecol-2023-0014.
31. Golubina O.A., Gorelski V.A., Zhiltsov K.N., Laikom A.O. Properties of pyrogenic eutrophic peat soil of Tagan mire (south of Tomsk oblast). *Tomsk State University Journal*, 2015, vol. 391, pp. 232–237. (In Russ.) DOI: 10.17223/15617793/391/37.
32. Kjær H.A., Dallmayr R., Gabrieli J., Goto-Azuma K., Hirabayashi M., Svensson A., Vallenga P. Greenland ice cores constrain glacial atmospheric fluxes of phosphorus. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, vol. 120, pp. 10,810–10,822. DOI: 10.1002/2015JD023559.
33. Hou E., Chen C., Luo Y., Zhou G., Kuang Yu., Zhang Yu., Heenan M., Lu X., Wen D. Effects of climate on soil phosphorus cycle and availability in natural terrestrial ecosystems. *Glob Chang Biol*, 2018, vol. 24, no. 8, pp. 3344–3356. DOI: 10.1111/gcb.14093. Epub 2018 Mar 5.
34. Turu V., Carrasco R.M., López-Sáez J.A., Pontevedra-Pombal X. Palaeoenvironmental changes in the Iberian central system during the Late-glacial and Holocene as inferred from geochemical data: a case study of the Navamuño depression in western Spain. *Catena*, 2021, vol. 207, pp. 105689. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105689.

35. Danilenko A.O., Kosmenko L.S., Reshetnyak O.S., Kondakova M.Y. Preconditions to technogenic metamorphization of Nadym river water ionic composition in conditions of global climate change. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*, 2020, no. 1, pp. 127–137. (In Russ.) DOI: 10.31857/S2587556620010069.
36. Tretiakov M.V., Rumiantseva E.V., Bryzgalo V.A., Piskun A.A., Vasilevich I.I. Spatial-temporal variability of hydrochemical characteristics of the gulf of Ob and Taz bay. *Arctic: Ecology and Economy*, 2022, vol. 12, pp. 46–57. (In Russ.) DOI: 10.25283/2223-4594-2022-1-46-57.
37. Pozhitkov R.YU., Moskovchenko D.V., Tigeev A.A. Trace elements in peat from ombrotrophic bogs of the Pur-Taz interfluvium. *Geographical bulletin*. 2020, no.1, vol. 52, pp. 154–165. (In Russ.) DOI: 10.17072/2079-7877-2020-1-154-165.
38. Opekunova M.G., Opekunov A.YU., Kukushkin S.YU., Arestova I.YU., Lisenkov S.A. Background content of chemical elements in plants of the north of Western Siberia and its change under the influence of oil and gas production. *Sibirskiy Ekologicheskii Zhurnal*, 2024, vol. 31, no. 2, pp. 359–372. (In Russ.) DOI: 10.15372/SEJ20240214.
39. Leonard J.M., Medina A.L., Neary D.G., Teale A. The influence of parent material on vegetation response 15 years after the dude fire, Arizona. *Forests*, 2015, vol. 6, 613–635. DOI: 10.3390/f6030613.
40. Ji S., Zhao H., Wang G., Cong J., Li G., Han D., Gao C. Effects of Fire Regime on Nitrogen Distribution in Marshlands of the Sanjiang Plain (NE China). *Fire*, 2024, vol. 7, no.10, pp. 339. DOI: 10.3390/fire7100339.
41. Kharanzhevskaya Yu.A., Sinyutkina A.A., Gashkova L.P. Integral estimation of pyrogenic loads on the contents of Cu, Pb, Zn and Cd in the components of the Great Vasyugan mire (Western Siberia). *Geosphere Research*, 2019, no. 4, pp. 62–73. (In Russ.) DOI: 10.17223/25421379/13/6.
42. Robakidze E.A., Bobkova K.S., Naimushina S.I. () Elemental composition of dominating plant species in different aged middle-taiga pine forests of the republic of Komi. *Plant resources*, 2020, vol. 56, no. 1, pp. 53–65. DOI: 10.31857/S0033994620010045.
43. Boldyreva E.A. Elemental composition of reindeer pasture plants and lichens in Nadym district (Yamal-Nenets autonomous area). *Plant Resources*, 2023, vol. 59, no.1, pp. 54–64. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0033994623010041.
44. Alexeeva-Popova, N.V., Drozdova, I.V. Micronutrient composition of plants in the Polar Urals under contrasting geochemical conditions. *Russian Journal of Ecology*, 2013, vol. 44, pp. 100–107. (In Russ.) DOI: 10.1134/S1067413613020033.
45. Zhurkova I.S. Influence of creeping fire on redistribution of chemical elements. *Geology and Mineral Resources of Siberia*, 2014, no. S3-2, pp. 11–13. (In Russ.)
46. Pristova T.A., Zagirova S.V. Elemental composition of plants in the foothill forests of the Subpolar Urals of the Komi Republic. *News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 142–146. (In Russ.)
47. Zhang Y., Pelletier R., Noernberg T., Donner M.W., Grant-Weaver I., Martin J.W., William Shotyk W. Impact of the 2016 Fort McMurray wildfires on atmospheric deposition of polycyclic aromatic hydrocarbons and trace elements to surrounding ombrotrophic bogs. *Environment International*, 2022, vol. 158, pp. 106910. DOI: 10.1016/j.envint.2021.106910.
48. Zhurkova I.S., Shcherbov B.L. The behavior of chemical elements in the forest grass-roots fires (Altai territory). *The bulletin of Irkutsk state university. Series "Earth sciences"*, 2016, vol. 16, pp. 30–41. (In Russ.)

Information about the authors

Lyudmila P. Gashkova, Cand. Sc., Senior Researcher, Siberian Federal Scientific Center of Agro-Bio Technologies of the Russian Academy of Sciences, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat, 3, Gagarin street, Tomsk, 634050, Russian Federation; Gashkova-lp@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6159-8294>

Anna A. Sinyutkina, Cand. Sc., Senior Researcher, Siberian Federal Scientific Center of Agro-Bio Technologies of the Russian Academy of Sciences, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat, 3, Gagarin street, Tomsk, 634050, Russian Federation; Ankalaeva@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0004-1283-0797>

Received: 10.12.2024

Revised: 17.12.2024

Accepted: 04.09.2025