

УДК 630*114.351:550.42

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ФРАКЦИЙ ТОРФЯНИСТЫХ ПОДСТИЛОК В ЮЖНОТАЕЖНЫХ БОЛОТНЫХ БЕРЕЗНЯКАХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2023 г. Т. Т. Ефремова^а, *, С. П. Ефремов^а, А. Ф. Аврова^а^аИнститут леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Академгородок, д. 50/28, Красноярск, 660036 Россия

*E-mail: efr2@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 30.06.2021 г.

После доработки 12.04.2022 г.

Принята к публикации 07.06.2022 г.

Изучались торфянистые подстилки мохово-древесного состава в насаждениях березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) травяно-мшистых групп типов леса в северной части междуречья Оби и Томи (географические координаты 56°23'18" с.ш., 084°32'51" в.д.). Подстилки характеризуются слабой насыщенностью основаниями – 35.6%, кислой реакцией среды – pH_{H_2O} 4.0, зольностью – 8.9%. Среднее содержание макро- и микроэлементов образует следующий нисходящий ряд, мг/кг: $Ca_{5105} > Fe_{4201} > Al_{3614} > K_{986} > Mg_{893} > Mn_{468} > Sr_{230} > Na_{153} > Zn_{51} > Pb_{13} > Cu_{6.8} > Ni_5 > Cr_{4.6} > Co_{2.9} > Cd_{0.2}$. Согласно факторному анализу, состав минеральной компоненты подстилок в процессе деструкции растительных остатков на 57% определяется изменчивостью содержания тяжёлых металлов, на 37% – щелочных, щелочноземельных, Zn, Cd. Методом древовидной кластеризации морфометрические фракции растительных фрагментов (дериваты) организовались следующим образом: >10 мм, [(10–5) + (5–3) + (3–2) + (2–1)] и [(1–0.5) + (0.5–0.25) + <0.25] мм. Дискриминантный анализ показал 100% попадание в соответствующую группу. Наибольший вклад в предсказание вносят Al и Ca. По мере распада растительных фрагментов тяжёлые металлы и алюминий последовательно накапливаются, щелочные и щелочноземельные металлы вымываются и наиболее активно – на стадии ферментации. Распределение минеральных компонентов в дериватах подстилок согласуется с их гумусным состоянием. В мелких морфометрических фракциях по сравнению с крупными фрагментами расширяется отношение $(\Sigma GK + \Sigma FK)/\text{полисахариды}$, сужается величина C/N, накапливаются гуминовые и фульвокислоты главным образом 1-й фракции. Торфянистые подстилки характеризуются средним, умеренно опасным уровнем загрязнения: суммарный показатель загрязнения (Zc) – 18. В составе токсикантов доминируют Pb, Zn – химические элементы I класса опасности.

Ключевые слова: мезотрофные березняки, дериваты, макро- и микроэлементы, гумусное состояние, суммарный показатель загрязнения, многомерный статистический анализ.

DOI: 10.31857/S002411482303004X, EDN: PSYISR

Лесообразовательный процесс на болотах сопровождается формированием подстилки. Морфолого-генетическое строение подстилки является важнейшим показателем и фактором лесного почвообразования в современных условиях и в полной мере отражает скорость и направленность трансформации лесного опада (Богатырев и др., 2008; Maier, 2008). Его деструкция под влиянием биологических и абиотических факторов обуславливает гетерогенность физико-химических и биохимических свойств растительного субстрата. К числу приоритетных показателей этих процессов относится зольность, которая в торфяных залежах болотных местообитаний служит важным индикатором их лесопригодности. Ингредиенты зольного состава играют многообразную роль в формировании условий почвенной среды на болотах. Щелочные и щелочноземельные металлы

(K, Na, Ca, Mg) формируют кислотно-основные свойства, элементы с переменной валентностью (Fe, Mn, Co, Cr) участвуют в регулировании окислительно-восстановительного режима. Многие тяжёлые металлы образуют комплексные соединения с гумусовыми кислотами и серо-, фосфор- и азотсодержащими лигандами. Органоминеральные комплексы подстилки способствуют формированию гумусовых горизонтов лесных почв и в случае аэрогенного поступления загрязняющих веществ обеспечивают долговременное изъятие этих потоков из окружающей среды.

Установлено, что регулирование потоков тяжёлых металлов в лесных экосистемах, наряду с физико-химическими факторами, обусловлено породным составом древостоев, характером напочвенного покрова, геохимической специализацией растений и подтверждено многими работа-

ми (Ernst, 2006; Maestri et al., 2010; Sofo et al., 2012; Железнова, Тобратов, 2021). Последующее распределение тяжелых металлов в значительной мере определяется составом, строением, мощностью подстилки, удерживающая способность которой наиболее выражена в подстилке типа мор или модер-мор в интервале до 3.5–4.0 см (Щеглов и др., 2005). В верхнем слое подстилки (L) ТМ находятся преимущественно в подвижной форме, в нижележащих слоях (F, H) — в составе трудно растворимых органоминеральных комплексов. Формирование стратифицированного профиля лесной подстилки сопровождается последовательной деструкцией растительного опада. Как элементы морфологической дифференциации, дериваты, являясь структурной частью подстилки, ассоциативно связаны между собой, однако в вещественном отношении могут достоверно различаться и представлять скорее дискретные, чем континуальные совокупности (Богатырев и др., 2004). Изучение в профиле подстилки свойств растительных фрагментов, в частности, концентрации тяжелых металлов, является реальным методическим приемом характеристики стадий преобразования лесного опада. Между тем особенности накопления тяжелых металлов в подстилке в связи с особенностями морфолого-генетического сложения остаются не изученными в полной мере до последнего времени.

С изложенных позиций роль подстилки болотных лесов в регулировании потоков тяжелых металлов практически не затронута исследованиями. Подстилка, как поверхностный горизонт лесных гидроморфных местообитаний, чаще всего не вычленяется при оценке техногенного загрязнения торфяных залежей (Shotyk, 1996; Бернатонис и др., 2002; Rausch et al., 2005; Jia et al., 2006; Ogru, 2006; Тарханов, 2011; Fikiewicz-Kozie et al., 2011; Федорец, Солодовников, 2013; Ефремова, Ефремов, 2014; Василевич, 2018; Леонова и др., 2018; Липатов и др., 2018; Bao et al., 2018, 2019; Богуш и др., 2019). Признание за подстилкой особых биогеохимических функций на пути вертикальной миграции элементов-загрязнителей ставит специфические задачи ее исследования в различных регионах (Щеглов и др., 2005).

Цель настоящей работы — оценить последовательность распределения макро- и микроэлементов в морфометрических фракциях (дериватах) лесной подстилки как проявление процесса преобразования ее минеральной компоненты и фактора дифференциации на генетические подгоризонты в ходе почвообразования.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Заболоченные и болотные березняки в составе лесного фонда таежной зоны Западно-Сибирского региона занимают площадь около 15.5 млн га

с запасом стволовой древесины, превышающей 1.6 млрд м³ (Лесной фонд России, 1999). Объектом исследования послужил олиго-мезотрофный слабо естественно-дренированный массив Еловочного болота — одного из элементов крупной системы болот (2.3 тыс. га) в северной части междуречья Оби и Томи южнотаежной подзоны Западной Сибири (географические координаты 56°23'186" с.ш., 084°32'519" в.д.). Болото питается “мягкой” верховодкой, поступающей из окаймляющих песчаных грив, и атмосферными осадками. К настоящему времени здесь сформировалась локально обособленная внутриволотная гидрографическая сеть, стержневым элементом которой является русло речки Еловки. Весной на поверхности торфяной залежи осаждаются взвешенные наносы талых вод, богатых растворенным органическим веществом гумусовой природы. В настоящее время в прибрежной части Еловочного болотного массива (около 300 м) произрастают древостои березы пушистой. По мере удаления от русла р. Еловки снижается проточность вод, что сопровождается ухудшением гидрологических условий (повышением уровня грунтовых вод и влажности почв), возрастанием олиготрофности торфяного субстрата и сменой доминирующих растительных группировок в напочвенном покрове. Крупнотравные группы березняков, приближенные к руслу, сменяются на расстоянии 190–270 м травяно-мшистыми. Здесь состав древостоя по запасу составляет 8Б2С. Сумма площадей сечений — 17.8–20.3 м²/га⁻¹, полнота — 0.9–1.0 при густоте стволов 1120–1260 экз. га⁻¹. Средняя высота древостоя — 13.7 м, диаметр — 14.1 см, возраст — 48–60 лет. Запасы древесины — в пределах 114–127 м³/га⁻¹, класс бонитета III–IV. В напочвенном покрове преобладают сфагновые мхи (сфагнум божественный (*Sphagnum magellanicum*), сфагнум центральный (*Sph. centrale*), сфагнум бурый (*Sph. fuscum*), сфагнум узколистый (*Sph. angustifolium*), сфагнум оттопыренный (*Sph. squarrosum*)), лесные зеленые мхи (дикранум многоножковый (*Dicranum polysetum*), политрихум обыкновенный (*Polytrichum commune*), плевроциум Шребера (*Pleurozium schreberi*)), осоки (осока волосистоплодная (*Carex lasiocarpa*), осока топяная (*C. limosa* L.), осока носатая (*C. rostrata*), осока магелланская (*C. magellanica*), осока шаровидная (*C. globularis*)), вахта трехлистная (*Menyanthes trifoliata* L.), пушица влагалищная (*Eriophorum vaginatum* L.) и др. В течение 2004–2007 гг. уровень поверхностных вод на таком удалении от реки колеблется в теплый период от 20 до 52 см и в среднем составляет 33 см. В травяно-мшистых березняках корнеобитаемая зона 0–30 см представлена мезотрофным (переходным) типом почв, которые формируются на мощных лесо-топяных торфах (290 см). Они характеризуются относительно

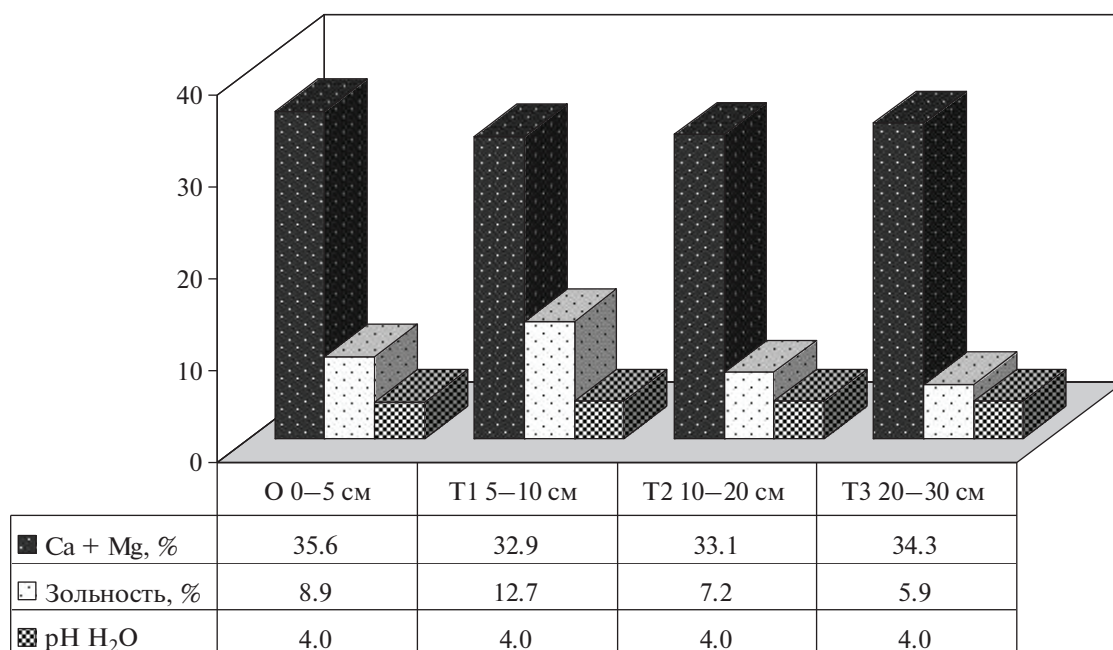


Рис. 1. Физико-химическая характеристика мезотрофной торфяной почвы под травяно-мшистым березняком.

низкой зольностью, слабой насыщенностью основаниями и кислой реакцией среды (рис. 1).

В таких местообитаниях формируются торфянистые подстилки древесно-мохового состава. Среднее количество опада в травяно-мшистом березняке равняется 281–267 г/м². Доля древесных остатков составляет – 66–68%, в которых доминируют листья березы. Вклад травяно-мохового покрова – 32–34%, преобладают сфагновые мхи. Наличие торфянистой подстилки в болотных березняках лимитирует возобновление материнской породы. Мелкие семена березы пушистой, имея низкую грунтовую всхожесть (16–21%), при рассеве на поверхности подстилки быстро теряют способность к прорастанию, а большая часть появившегося светлюбивого самосева заглушается плотным покровом мхов, осок и пушицы. В результате численность подроста березы не выходит за пределы 300–350 экз. га⁻¹. Мощность подстилки за 4-летний период наблюдений изменялась от 3.5 до 7.8 см (среднее 5.5), запасы – 1.66–4.17 кг/м² (2.77). Подстилка характеризуется в среднем следующим морфолого-генетическим строением: L_{2.5}–F_{2.0}–H_{<1} (нижние индексы, см). По химическим свойствам торфянистые подстилки практически не отличаются от нижележащих слоев торфа. Граница между ними хорошо выражена по составу – древесно-моховому и моховому, сложению – губчатому и слоисто-горизонтальному и плотности субстрата – 0.052 и 0.100 г/см³.

Отбор образцов проводился по доминантным растительным группировкам в период максимального разложения опада в годовом цикле

(первая половина августа). За время наблюдений было выполнено более 50 морфолого-генетических описаний торфянистых подстилок по критериям А.П. Сапожникова (1984). Название почвы дано по классификации Н.И. Пьявченко, основанной на химическом принципе – насыщенности торфяного субстрата основаниями и величине pH (Пьявченко, Корнилова, 1978). Физико-химические показатели почв и подстилок выявляли по общепринятым в почвоведении методам (Агрохимические методы ..., 1975). Валовое содержание макро- и микроэлементов в подстилке определяли атомно-абсорбционным методом на спектрометре МГА-915МД (Россия). Групповой и фракционный состав органического вещества выполнен по методике В.В. Пономаревой и Т.А. Николаевой (1961). Дифференциация торфянистой подстилки по морфометрическим фракциям (derivатам) произведена путем рассева на почвенных ситах. Многомерный статистический анализ проведен в программе EXCEL и STATISTICA 6 по руководствам Дж.-О. Кима с соавторами и А.А. Халафяна (Ким и др., 1989; Халафян, 2007).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Морфологическое описание фракционного состава торфянистой подстилки приведено в табл. 1.

В составе подстилки доминируют крупные фрагменты (>10 мм) – 26%. В относительно близком соотношении присутствуют фракции 10–7, 7–5, 5–3, 3–2 и 2–1 мм (9–15%). Количество наиболее диспергированных частиц 1–0.5, 0.5–0.25 и

Таблица 1. Характеристика морфометрических фракций торфянистой подстилки березняка травяно-мшистого

Размер фракций, мм	Весовая доля в подстилке, %	Цвет	Компонентный состав	
			степень деструкции растительных остатков	агрегированность растительной субстанции
>10	26	Светло-бурый	Сохранившиеся листья и кора березы, веточки, шишки сосны – 30–35%	Микропористые, механически непрочные крупноореховатые отдельности моховых остатков, склеенные органическими коллоидами – 65–70%
10–7	9.4	Бурый	Листья березы, остатки мхов, стебли трав, хвоя, веточки, сильно размягченные – 50%	Ореховатые отдельности, аналогичного состава – около 50%
7–5	10.1	Темно-бурый	Аналогичные по составу и степени разложения фрагменты – 75%	Мелкоореховатые агрегаты аналогичного состава – 25–30%
5–3	14.9	Темно-бурый	Сильно мацерированные древесные остатки с небольшим включением стеблей трав и сфагновых мхов – 75%	Непрочные крупнозернистые агрегаты трудно распознаваемых остатков мхов, склеенных гумусовой плазмой – 25%
3–2	12.2	Темно-бурый	Сильноразложившиеся нераспознаваемые растительные остатки – около 70%	Зернистые агрегаты гумусовой природы – около 30%
2–1	12.9	Темно-бурый	Аморфная неагрегированная гумусированная масса – 90%	Непрочные зернистые агрегаты гумусовой природы – около 10%
1–0.5	6.5	Темно-бурый	Аморфная гумусированная субстанция – 90–95%	Мелкозернистые гумусовые агрегаты – 5–10%
0.5–0.25	4.6	Темно-бурый	Аморфная гумусированная масса	Нет
<0.25	3.0	Темно-бурый	Аморфная гумусированная субстанция с единичным включением фрагментов сфагновых мхов	Нет

<0.25 мм значительно меньше – 3–6%. Средневзвешенное содержание макро- и микроэлементов в подстилке ранжировано в порядке убывания: $\text{Ca}_{5105} > \text{Fe}_{4201} > \text{Al}_{3614} > \text{K}_{986} > \text{Mg}_{893} > \text{Mn}_{468} > \text{Sr}_{230} > \text{Na}_{153} > \text{Zn}_{51} > \text{Pb}_{13} > \text{Cu}_{6.8} > \text{Ni}_5 > \text{Cr}_{4.6} > \text{Co}_{2.9} > \text{Cd}_{0.2}$, мг/кг. В пересчете на гектар запасы макро- и микроэлементов составляют: $\text{Ca}_{146} > \text{Fe}_{120} > \text{Al}_{103} > \text{K}_{28.2} > \text{Mg}_{25.6} > \text{Mn}_{13.4} > \text{Sr}_{6.6} > \text{Na}_{4.4} > \text{Zn}_{1.5} > \text{Pb}_{0.37} > \text{Cu}_{0.19} > \text{Ni}_{0.14} > \text{Cr}_{0.13} > \text{Co}_{0.084} > \text{Cd}_{0.006}$, кг/га. Приведенные данные свидетельствуют о преимущественном накоплении в торфянистой подстилке щелочноземельных металлов и полуторных оксидов. Основным источником металлов в торфянистой подстилке является атмосферная пыль и биогенное накопление мхами, лишайниками, березой, сосной изучаемого фитоценоза. Содержание элементов в морфометрических фракциях (дериватах) лесной подстилки характеризуется в основном высокой вариабельностью – $\text{Cv} > 25\%$ (табл. 2). Наиболее сильно варьирует Fe, Al, Mn (Cv 49–77%), менее остальных – K, Cu, Cd, Cr (Cv 13–20%).

Воды, питающие мезотрофное Еловочное болото, сильноокислые (pH 3.4), обогащенные растворимым углеродом (143 мг/л), в силу низкой минерализации (14 мг/л) не могут оказывать заметного влияния на величину и состав минеральной компоненты. Химические элементы торфянистой подстилки в большинстве случаев тесно взаимосвязаны. Высокий уровень корреляции металлов в торфяных субстратах установлен также рядом авторов (Jia et al., 2006; Bao et al., 2019). Согласно табл. 3, в прямой связи друг с другом состоят тяжелые металлы Fe, Cu, Ni, Pb, Co, Cr, Pb ($r = 0.80–0.98$), подобным образом взаимосвязаны K, Ca, Mg, Zn, Mn ($r = 0.69–0.98$). В то же время металлы выявленных совокупностей находятся между собой в антагонистических отношениях, то есть достоверно отрицательно коррелируют.

С целью редукции переменных в оценке структуры взаимосвязей металлов с размерами дериватов выполнили факторный анализ, основная идея которого – объединение коррелированных переменных и выделение скрытых общих факторов, объясняющих связи между наблюдае-

Таблица 2. Содержание макро- и микроэлементов в морфометрических фракциях (дериватах) торфянистой подстилки травяно-мшистого березняка, мг/кг

Элементы	Размеры морфометрических фракций, мм								m^*	Cv, %
	>10	10–5	5–3	3–2	2–1	1–0.5	0.5–0.25	<0.25		
Pb	7.58	14.81	16.05	7.7	16.97	16.73	16.4	17.44	12.97	29
Fe	1430	3860	4440	3660	5250	7350	9130	8430	4200.6	49
Al	710	3000	3370	2650	4180	8800	9380	10390	3613.5	69
Cu	5.74	6.69	6.8	6.92	6.97	7.89	7.77	8.75	6.76	13
Co	1.45	2.59	2.89	3.14	3.65	4.68	4.92	4.88	2.92	35
Ni	2.82	4.76	5.01	5.49	5.83	7.73	6.05	7.74	4.95	28
Cr	3.84	4.11	4.23	5.15	5.03	5.86	5.39	7.6	4.63	23
Mn	1030	390	300	270	240	210	230	220	467.7	77
Cd	0.25	0.18	0.17	0.18	0.19	0.24	0.26	0.26	0.21	20
Sr	130	220	290	200	210	420	320	380	230.0	36
Zn	71.32	42.16	39.55	37.96	40.72	56.84	61.17	65.53	50.85	26
Ca	6930	4720	4420	4340	4320	4690	5040	4350	5104.9	18
Mg	1440	730	650	660	680	820	910	880	893.4	31
K	1180	940	840	880	880	1020	1120	1080	986.5	13
Na	120	120	100	200	160	240	260	250	152.6	36

* m – средневзвешенное содержание, Cv – коэффициент вариации.

Таблица 3. Коэффициенты корреляции Пирсона макро- и микроэлементов

	Cu	Zn	Ni	Pb	Co	Cr	Cd	Fe	Mn	Sr	Al	K	Na	Ca	Mg
Cu		–0.25	0.97	0.80	0.96	0.93	0.09	0.95	–0.86	0.92	0.95	–0.31	0.84	–0.79	–0.66
Zn	–0.25		–0.37	–0.38	–0.26	–0.04	0.90	–0.17	0.69	–0.19	–0.03	0.98	0.05	0.79	0.89
Ni	0.97	–0.37		0.81	0.96	0.89	–0.01	0.90	–0.90	0.92	0.90	–0.43	0.81	–0.84	–0.74
Pb	0.80	–0.38	0.81		0.81	0.61	–0.10	0.84	–0.81	0.82	0.79	–0.44	0.48	–0.75	–0.69
Co	0.96	–0.26	0.96	0.81		0.87	0.13	0.98	–0.88	0.90	0.96	–0.30	0.89	–0.76	–0.66
Cr	0.93	–0.04	0.89	0.61	0.87		0.26	0.83	–0.68	0.80	0.89	–0.12	0.86	–0.62	–0.45
Cd	0.09	0.90	–0.01	–0.10	0.13	0.26		0.21	0.35	0.14	0.34	0.88	0.42	0.51	0.65
Fe	0.95	–0.17	0.90	0.84	0.98	0.83	0.21		–0.82	0.90	0.98	–0.21	0.86	–0.70	–0.59
Mn	–0.86	0.69	–0.90	–0.81	–0.88	–0.68	0.35	–0.82		–0.79	–0.74	0.71	–0.63	0.97	0.94
Sr	0.92	–0.19	0.92	0.82	0.90	0.80	0.14	0.90	–0.79		0.93	–0.27	0.75	–0.69	–0.59
Al	0.95	–0.03	0.90	0.79	0.96	0.89	0.34	0.98	–0.74	0.93		–0.08	0.89	–0.61	–0.47
K	–0.31	0.98	–0.43	–0.44	–0.30	–0.12	0.88	–0.21	0.71	–0.27	–0.08		0.04	0.82	0.90
Na	0.84	0.05	0.81	0.48	0.89	0.86	0.42	0.86	–0.63	0.75	0.89	0.04		–0.49	–0.35
Ca	–0.79	0.79	–0.84	–0.75	–0.76	–0.62	0.51	–0.70	0.97	–0.69	–0.61	0.82	–0.49		0.98
Mg	–0.66	0.89	–0.74	–0.69	–0.66	–0.45	0.65	–0.59	0.94	–0.59	–0.47	0.90	–0.35	0.98	

Примечание. Коэффициенты корреляции >0.72, значимые на уровне $\alpha < 0.05$.

мыми признаками. Сочли возможным установить пять факторов: максимальное число выделяемых факторов может быть равно числу переменных (Халафян, 2007). В таблице 4 приведены собственные числа факторов – дисперсии, объясненные последовательными факторами. Как видно, пять факторов кумулятивно объясняют 99.7%

общей дисперсии. Из них – первый фактор – 57%, второй – 37%, все последующие от 2.4 до 1% дисперсии. Для оптимального решения вопроса о редукции переменных воспользовались критерием Кайзера и выбрали факторы с собственными значениями больше единицы, сохранив только два (Ким и др. 1989). Рассмотрим полученное ре-

Таблица 4. Факторные нагрузки и собственные числа выделенных факторов

Химические элементы, оценка факторов	Номера выделенных факторов				
	1	2	3	4	5
Pb	0.86*	−0.51	−0.02	0.06	0.00
Fe	0.97*	0.14	−0.11	0.00	0.17
Al	0.96*	0.26	0.01	−0.03	0.04
Cu	0.97*	0.06	0.24	−0.06	0.03
Co	0.98*	0.05	−0.01	0.16	0.10
Ni	0.95*	−0.11	0.20	0.13	−0.16
Cr	0.83*	0.18	0.52	0.04	0.01
Mn	−0.80*	0.57	0.02	−0.11	−0.10
Cd	0.42	0.91*	0.00	0.05	0.01
Sr	0.93*	0.06	−0.07	−0.13	−0.34
Zn	0.13	0.98*	0.09	−0.11	−0.05
Ca	−0.61	0.77*	−0.17	−0.02	−0.07
Mg	−0.41	0.91*	0.02	−0.05	−0.06
K	0.06	0.99*	−0.02	−0.06	0.09
Na	0.18	0.88*	0.07	0.42	0.06
Дисперсия выделенных факторов	8.51	5.62	0.36	0.31	0.15
% от общей дисперсии	56.74	37.46	2.38	2.09	1.03
Кумулятивная дисперсия	8.51	14.13	14.49	14.80	14.95
Кумулятивный, %	56.74	94.20	96.58	98.67	99.70

* Коэффициенты корреляции, значимые на уровне $\alpha < 0.05$.

шение с точки зрения содержательной интерпретации. Обратимся к корреляционной связи между выделенными факторами и переменными. Из табл. 4 следует, что существует высокая факторная нагрузка по переменным обеих групп. При этом фактор 1 коррелирует, главным образом, с тяжёлыми металлами — Pb, Fe, Cu, Co, Ni, Cr, Mn, Sr и Al. Фактор 2 — со щелочными, щелочноземельными элементами Na, K, Mg, Ca и металлами с выраженными амфотерными свойствами Zn и Cd. Следовательно, состав минеральной компоненты торфянистой подстилки по мере деструкции растительных остатков определяется изменчивостью содержания тяжёлых металлов и алюминия на 57%, щелочных, щелочноземельных Cd и Zn — на 37%.

Чтобы ответить на вопрос, существует ли стабильность в изменении минеральных компонентов подстилки вследствие деструкции растительного материала, воспользовались методом древовидной кластеризации, цель которой — объединение объектов в классы, при этом применили меру сходства или расстояние между объектами. Согласно рис. 2а, дериваты торфянистой подстилки по содержанию химических элементов четко объединились в три кластера: >10 мм, (10–1) и (1– <0.25) мм. Меру близости выделенных кластеров оценили, используя квадраты расстояния Махаланобиса в

дискриминантном анализе. Кластер хорошо сохранившихся растительных остатков размером >10 мм наиболее удален от объединенных фрагментов (1– <0.25) мм и приближен к (10–1) мм. Квадраты расстояния Махаланобиса — 310–174 соответственно. Достоверность различий — $p < 0.001$. Попадание в соответствующую группу — 100%.

Сходство выделенных кластеров проиллюстрируем заданными точками в исходном пространстве признаков с помощью метода многомерного шкалирования, позволяющего максимально сохранить реальные расстояния между ними (рис. 2б). Эффективность разбиения объектов характеризует ясность полученной конфигурации и величину критерия согласия, стресс — 0.0000019 (чем меньше значения стресса, тем лучше матрица исходных расстояний согласуется с матрицей результирующих расстояний). Выполненная группировка растительных фрагментов соответствует в определённой мере их количественному содержанию в подстилке и морфологическому облику. На этом основании с определённым допущением можно соотнести выделенные кластеры растительных фрагментов >10 мм, (10–1) и (1– <0.25) мм с подгоризонтами подстилки — L (листовым), F (ферментативным) и H (гумифицированным) соответственно. С целью выявления показателей, вносящих наибольший вклад в прогнозирование

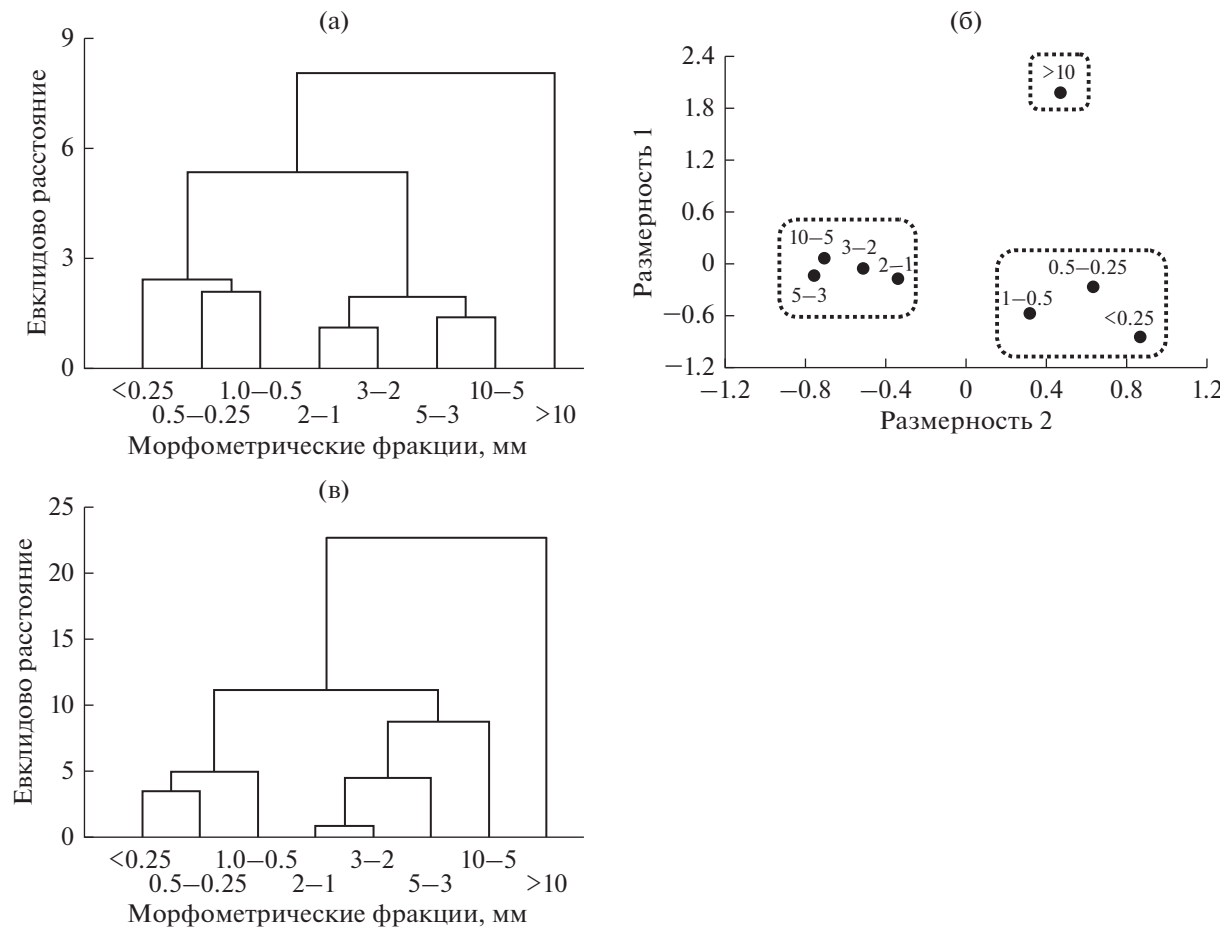


Рис. 2. Дендрограмма морфометрических фракций по содержанию макро- и микроэлементов (а) и размещение на плоскости в многомерном пространстве признаков (б), группировка морфометрических фракций по гумусному состоянию (в).

принадлежности растительных остатков к выделенным кластерам, и сохранения только важных переменных в модели выполнили дискриминантный анализ (табл. 5). Согласно статистическим оценкам, лучшими дискриминаторами группировки растительных фрагментов являются Al и Ca.

Кластеры растительных фрагментов, организованные по размерам на основании содержания макро- и микроэлементов, соответствуют их группировке по совокупности показателей гумусного состояния (рис. 2в), выполненной ранее (Ефремова

и др., 2009). Как следует из рисунка 3, по мере деградации лесного опада последовательно нарастает степень его биохимического преобразования. В сгруппированных частицах (1–<0.25 мм) относительно дериватов >10 мм сужается отношение C/N в 1.7 раза, что косвенно свидетельствует о повышении биологической активности и подтверждается снижением количества полисахаридов на 35% (рис. 3а). Согласно рис. 3б, в мелких фракциях по сравнению с крупными фрагментами степень гумификации (Σ ГК + ФК) повышает-

Таблица 5. Показатели дискриминации морфометрических фракций торфянистой подстилки по содержанию макро- и микроэлементов

Дискриминаторы	Лямбда Уилкса	Частичная лямбда Уилкса	F-критерий	p-уровень	Толерантность (T)	R ² (1–T)
Статистическая оценка модели дискриминации: Лямбда Уилкса = 0.0007, F-критерий = 109, p-уровень < 0.001						
Al	0.0293	0.0243	120.44	0.000014	0.744	0.256
Ca	0.0205	0.0347	83.44	0.000042	0.744	0.256

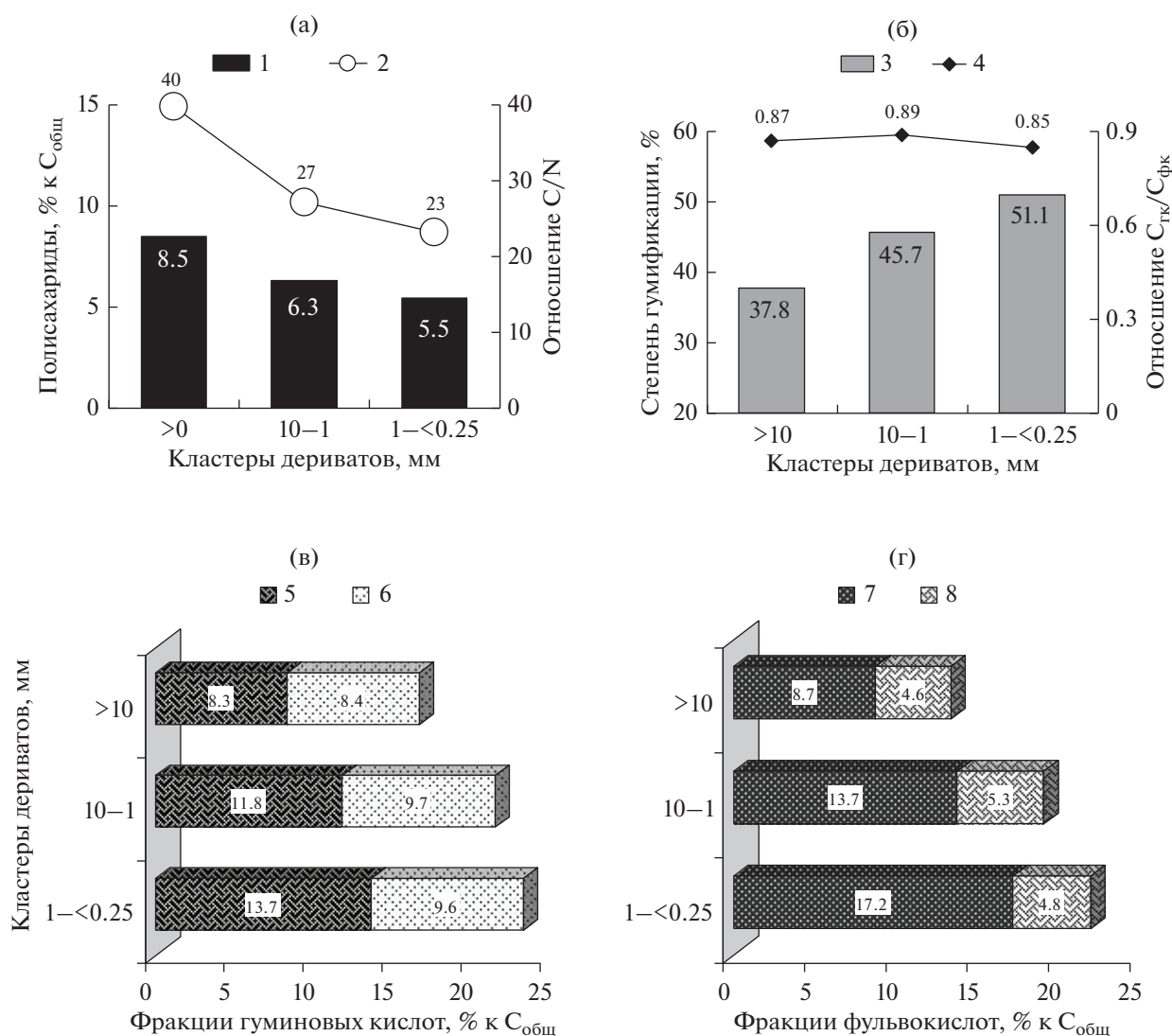


Рис. 3. Групповой и фракционный состав органического вещества кластеров морфометрических фракций (дериватов) торфянистой подстилки: а – показатели биологической активности, б – гумусное состояние, в – фракции гуминовых кислот, г – фракции фульвокислот. 1 – содержание полисахаридов 2 – отношение C/N , 3 – степень гумификации ($\Sigma ГК + \Sigma ФК$), 4 – отношение $C_{гк}/C_{фк}$, 5 – содержание ГК-1, 6 – содержание ГК-3, 7 – содержание ФК-1, 8 – содержание ФК-3.

ся с 37.8 до 51.1%. Это обусловлено почти двукратным увеличением содержания как гуминовых, так и фульвокислот первой фракции (рис. 3в, 3г). В процессе диспергирования растительных остатков незначительно повышается и содержание гумусовых кислот 3-й фракции. Тип гумуса, согласно отношению $C_{гк}/C_{фк}$ 0.85–0.89, сохраняется гуматно-фульватным независимо от степени трансформации субстрата.

Формирование органических кислот из промежуточных продуктов разложения растительных остатков в результате биохимического окислительного кислотообразования – первый элементарный процесс гумификации (Александрова, 1980). На

начальном этапе осуществляется также взаимодействие гумусовых кислот с минеральной частью. Формы этого взаимодействия и одновременно протекающих реакций многообразны: образование солей и комплексных соединений, явления хемосорбции и адсорбции, сочетание пептизации и коагуляции, адгезии и когезии, что сопровождается формированием различных по составу органо-минеральных соединений как неперменного звена любого типа почвообразования (Орлов, 1990). Комплексообразователями служат металлы переменной валентности или с выраженными амфотерными свойствами – Cu, Ni, Co, Zn, Cd, Fe, Mn, Al (Александрова, 1980). образу-

ющиеся металло-гумусовые соединения при всем своем многообразии подразделяются на две категории — мигрирующие или аккумулирующиеся в профиле почвы. Нерастворимые осадки с катионами железа, алюминия и двухвалентными катионами образуют гуминовые кислоты, нерастворимые соединения в определенных диапазонах pH дают и фульвокислоты, однако существуют большой разброс найденных параметров и очень слабая привязка к условиям почвообразования (Орлов, 1990).

С изложенных позиций обсудим содержание макро- и микроэлементов в дериватах торфянистой подстилки. В общем плане оно обусловлено размерностью растительных фрагментов, степенью их биохимического преобразования и гумификации. При этом распределение металлов, объединенных фактором 1 (тяжелые металлы) и фактором 2 (щелочные, щелочноземельные элементы, Zn и Cd), в дериватах различной размерности характеризуется противоположной направленностью.

Тяжелые металлы как элементы-комплексобразователи последовательно накапливаются по мере распада растительных остатков в соответствии с возрастанием степени их гумификации (рис. 4а, 4б). В отличие от поливалентного марганца, количество которого в гранулометрических фракциях ($1 < 0.25$ мм) снижается до 220 относительно 1030 мг/кг в дериватах > 10 мм. Среди тяжелых металлов марганец обладает самой низкой способностью к комплексообразованию, образующиеся органические комплексы неустойчивы и энергично мигрирует в кислых ландшафтах заболоченных аккумулятивных равнин в простой катионной форме Mn^{2+} (Перельман, Касимов, 1999). Активнее всего концентрируются алюминий и железо, количество которых возрастает — в 13 и 6 раз соответственно, что подтверждает результаты модельных лабораторных опытов по мобилизации минеральных компонентов гумусовыми веществами. Показано: количество железа, связываемого гумусовыми кислотами, меньше по сравнению с алюминием, образующиеся гуминовые комплексы устойчивы и выпадают в твердую фазу на месте своего образования (Александрова, 1980). Аккумуляция микроэлементов не столь масштабна. Тем не менее в процессе преобразования лесной подстилки наиболее гумифицированные растительные фрагменты ($1-0.25$ мм) обогащаются на 56–70% — Co, Sr, Ni, Pb, на 29–39% — Cr и Cu по сравнению Fe, Al — 83–93%.

Щелочные, щелочноземельные элементы и металлы с амфотерными свойствами (Zn и Cd) энергично мигрируют по мере распада растительных остатков (рис. 4в). Наиболее интенсивно процесс мобилизации протекает в морфометри-

ческих фракциях ($10-1$ мм), адекватных в той или иной степени ферментативному слою активного разложения дериватов. Важную роль на этой стадии выщелачивания играет карбонатное равновесие. Процесс распада сопровождается обильным выделением CO_2 , при его растворении появляется анион HCO_3^- , который с металлами образует растворимые гидрокарбонатные соли. Кислое выщелачивание сопровождается снижением количества Na, Ca, Mg, Zn вдвое, K и Cd — в 1.4 раза. Интенсивность мобилизации металлов из наиболее гумусированных растительных фрагментов ($1 < 0.25$ мм) несколько замедляется, вероятно, за счет формирования некоторой части нерастворимых гуматов, в соответствии с итогами модельных лабораторных опытов, изложенными выше по литературным данным. Интенсивность выноса в большей мере снижается у K за счет биогенного поглощения, у Zn — вследствие формирования нерастворимых фульватных комплексов. На уровень крупных морфометрических фракций возвращается содержание Cd в результате дополнительной сорбции Al-Fe-гумусовыми комплексами. Натрий, соединения которого отличаются высокой растворимостью, активно мигрирует на всех стадиях распада растительных остатков. По мере деструкции лесного опада в условиях кислой среды из подстилки выщелачивается 55% натрия, 32–40% кальция, магния, 9% калия и 14% цинка. Установлено: в исследуемых березняках Еловочного болота кальций активно поступает в почвенные растворы и выносится с дренажными водами за пределы, однако определенная его часть закрепляется биогенным путем (Мелентьева, 1980). Свидетельством тому служит повышенное содержание кальция в листьях березы — 1.45% относительно осок — 0.93% и сфагновых мхов — 0.25% и некоторая концентрация элемента в торфяных горизонтах непосредственно под подстилкой 4(5)–10(12) см.

Торфяно-болотные экосистемы, представляя собой механический, кислородный, биогенный и сорбционный геохимический барьер, накапливают многие химические элементы и считаются высокоинформативными объектами для организации мониторинга техногенных изменений окружающей природной среды. Изучаемые болотные березняки, безусловно, подвержены аэротехногенным выбросам промышленных агломераций Томской, Новосибирской областей, масштабное хозяйственное освоение которых сопровождается повышенным объемом антропогенных нагрузок на природную среду.

Оценку техногенного геохимического давления на подстилку выполнили, рассчитав суммарный показатель загрязнения по формуле Саета (Сае и др., 1990):

$$Zc = \sum Kc - (n - 1),$$

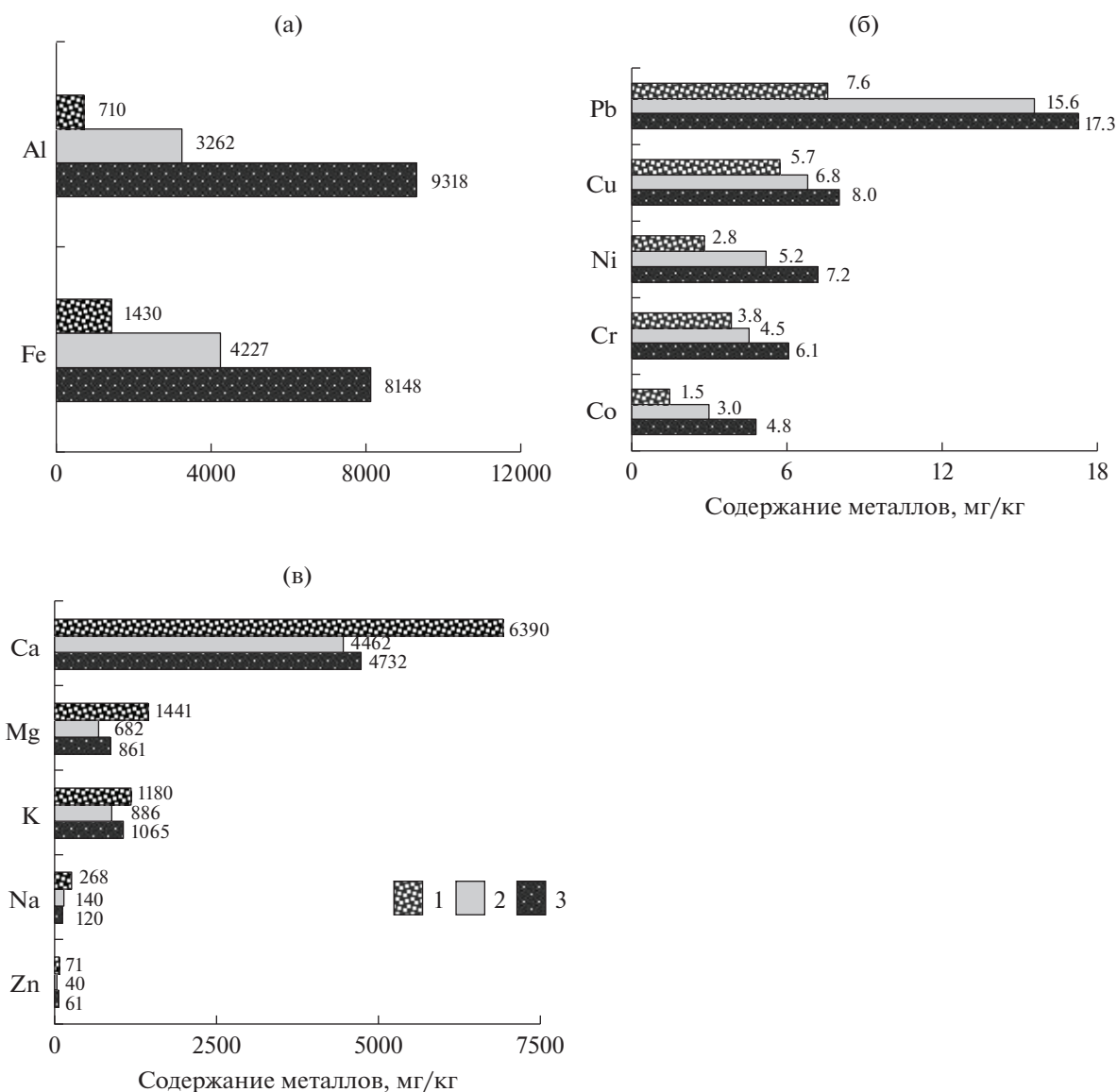


Рис. 4. Содержание в кластерах морфометрических фракций торфянистой подстилки полуторных оксидов — (а), микро-элементов — (б), щелочных, щелочноземельных металлов и Zn — (в). Кластеры морфометрических фракций: 1 — >10 мм, 2 — 10-1 мм, 3 — <0.25 мм.

где Z_c — суммарный показатель загрязнения, K_c — коэффициент техногенной концентрации больше 1, n — число элементов с K_c больше 1.

Техногенные концентрации определяются, как известно, относительно геохимического фона. В болотных экосистемах природный фон тяжелых металлов сильно дифференцирован, и пока нет разработанных жестких критериев ни по регионам, ни по типам торфяных почв, что утверждают и другие авторы (Московченко, 2006; Безносиков и др., 2007). За фон приняты малонаселенную, расположенную вдали от локальных техногенных источников территорию междуречья Бакчара и Иксы в юго-восточной части Васюганской лесо-болотной равнины (Инишева, Цыбу-

кова, 1999). Согласно шкале ориентировочной оценки, суммарный показатель характеризует средний, умеренноопасный уровень загрязнения торфянистой подстилки болотных березняков (табл. 6).

В составе токсикантов доминируют Zn и Pb (элементы I класса опасности). Почти половина техногенных потоков Pb и Zn, насколько известно, поступает в природную среду при выплавке цветных и черных металлов, добыче полиметаллических руд, существенна также роль автотранспорта в загрязнении среды. Немаловажное значение имеет близость Кузбасского каменноугольного бассейна. По мнению Я.Э. Юдовича, в золе углей концентрируется в сотни и тысячи раз

Таблица 6. Оценка загрязнения тяжелыми металлами торфянистой подстилки травяно-мшистого болотного березняка

Количественные показатели	Элементы-токсиканты, класс опасности							Показатели загрязнения		Оценка уровня загрязнения
	I			II			III	Zc	доля Zn, Pb, %	
	Zn	Pb	Cd	Cu	Ni	Co	Mn			
Фон, мг/кг*	6.5	3.1	0.29	7	6.7	1.1	74.7	18	67	Средний, умеренно опасный
$\bar{x}$, мг/кг	50.8	13.0	0.21	6.76	4.95	2.92	468			
Kc	7.8	4.2	0.7	1.0	0.7	2.7	6.3			

* Содержание элементов определено атомно-адсорбционным методом, $\bar{x}$ — средневзвешенное содержание, Kc — коэффициент аномальности, Zc — суммарный показатель загрязнения. Класс опасности: I — высокий, II — умеренный, III — малоопасный (ГОСТ 17.4.1.02–83).

больше — Pb, Zn, Cu, Mo, Sn, Be, Hg по сравнению с другими осадочными породами (цит. по: Перельман, Касимов, 1999). Zn и Pb в гумидной зоне относятся к числу наиболее распространенных загрязнителей, а потенциальная опасность высокой интоксикации свинцом в большей мере присуща кислым почвам с периодическим восстановительным режимом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Запасы макро- и микроэлементов в подстилке березняков травяно-мшистых групп типов леса в северной части междуречья Оби и Томи составляют следующий нисходящий ряд: $\text{Ca}_{146} > \text{Fe}_{120} > \text{Al}_{103} > \text{K}_{28.2} > \text{Mg}_{25.6} > \text{Mn}_{13.4} > \text{Sr}_{6.6} > \text{Na}_{4.4} > \text{Zn}_{1.5} > \text{Pb}_{0.37} > \text{Cu}_{0.19} > \text{Ni}_{0.14} > \text{Cr}_{0.13} > \text{Co}_{0.084} > \text{Cd}_{0.006}$, кг/га.

Использование методов многомерного статистического анализа позволило объективно доказать, что по мере деструкции растительных остатков происходит континуально-дискретное биохимическое преобразование минеральной компоненты торфянистой подстилки, которое на 57% определяется совокупным влиянием тяжелых металлов и на 37% — преимущественно влиянием щелочно-земельных и щелочных.

Стадии метаморфоза дискриминируются формализованными растительными фрагментами >10 мм, (10–1) и (1–<0.25) мм, которые приближенно соответствуют листовому, ферментативному и гумифицированному подгоризонтам подстилки. Наилучшее предсказание выполняет линейная комбинация алюминия и кальция. По мере распада растительных остатков тяжелые металлы накапливаются в кластере наиболее гумусированных фрагментов (1–<0.25) мм, щелочные и щелочноземельные металлы, лишь частично сорбируясь в данном кластере, мигрируют за пределы торфяной залежи. Распределение минеральных компонентов в кластерах дериватов согласуется с состоянием их органического вещества.

Кластер наиболее мелких морфометрических фракций (1–<0.25) мм значительно богаче гумифицированными веществами. Торфянистые подстилки болотных березняков междуречья Оби и Томи характеризуются средним, умеренно опасным уровнями загрязнения. Формализованная группировка стадий преобразования лесного опада по накоплению металлов в растительных фрагментах подтверждает объективность лесоводственно-морфологических принципов диагностики подстилок на основе визуальных и морфометрических оценок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
- Александрова Л.Н. Органическое вещество почвы и процессы его трансформации. Л.: Наука, 1980. 288 с.
- Безносиков В.А., Лодыгин Е.Д., Кондратенко Б.М. Оценка фоновое содержания тяжелых металлов в почвах европейского северо-востока России // Почвоведение. 2007. № 9. С. 1064–1070.
- Бернатонис В.К., Архипов В.С., Здвизжков М.А., Прейс Ю.И., Тихомирова Н.О. Геохимия растений и торфов Большого Васюганского болота. Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития. Томск: Институт оптики атмосферы СО РАН, 2002. С. 204–215.
- Богатырев Л.Г., Демин В.В., Матышак Г.В., Сапожникова В.А. О некоторых теоретических аспектах исследования лесных подстилок // Лесоведение. 2004. № 4. С. 17–29.
- Богатырев Л.Г., Алябина И.О., Маречек М.С., Самсонова В.П., Кириченко А.В., Коновалов С.Н. Подстилка и гумусообразование в лесных формациях Камчатки // Лесоведение. 2008. № 3. С. 28–38.
- Богущ А.А., Бобров В.А., Климин М.А., Бычинский В.А., Леонова Г.А., Кривоногов С.К., Кондратьева Л.М., Прейс Ю.И. Особенности формирования отложений и концентрирования элементов в профиле торфяника Выдринский (Южное Прибайкалье) // Геология и геофизика. 2019. Т. 60. № 2. С. 194–208. <https://doi.org/10.15372/GiG2019012>

- Василевич Р.С. Макро- и микроэлементный состав мерзлотных бугристых торфяников лесотундры европейского северо-востока России // Геохимия. 2018. № 12. С. 1158–1172.
- ГОСТ 17.4.1.02-83. Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения. М.: Стандартинформ, 2008. 4 с.
- Ефремова Т.Т., Аврова А.Ф., Ефремов С.П., Мелентьева Н.В. Стадийность трансформации органического вещества подстилок болотных березняков // Почвоведение. 2009. № 10. С. 1203–1212.
- Ефремова Т.Т., Ефремов С.П. Эколого-геохимическая оценка уровней загрязнения тяжелыми металлами и серой бугристых торфяников юга Таймыра // Сибирский экологический журн. 2014. № 6. С. 965–974.
- Железнова О.С., Тобратов С.А. Роль растительности в регулировании потоков тяжелых металлов в подтаежных лесных экосистемах центра Восточно-Европейской равнины // Лесоведение. 2021. № 1. С. 11–27.
- Инишева Л.И., Цыбукова Т.Н. Эколого-геохимическая оценка торфов юго-востока Западно-Сибирской равнины // География и природные ресурсы. 1999. № 1. С. 45–51.
- Ким Дж.-О., Мьюллер Ч.У., Клекка У.Р., Олдендерфер М.С., Блэшфилд Р.К. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.
- Леонова Г.А., Мальцев А.Е., Бадмаева Ж.О., Шавекин А.С., Рубанов М.В., Преис Ю.И. Геоэкологическая оценка степени антропогенного загрязнения тяжелыми металлами экосистем верховых болот лесостепной зоны Западной Сибири // Экология промышленного производства. 2018. № 2(102). С. 64–73.
- Лесной фонд России (по данным государственного учёта лесного фонда по состоянию на 1 января 1998 г.). Справочник. М.: ВНИИЦлесресурс, 1999. 650 с.
- Липатов Д.Н., Щеглов А.И., Манахов Д.В., Карпунин М.М., Завгородняя Ю.А., Цветнова О.Б. Распределение тяжелых металлов и бенз(а)пирена в торфяных олиготрофных почвах и торфяно-глеоземах на северо-востоке о. Сахалин // Почвоведение. 2018. № 5. С. 551–562.
- Мелентьева Н.В. Почвы осушенных лесных болот. Новосибирск: Наука. 1980. 128 с.
- Московченко Д.В. Биогеохимические особенности верховых болот Западной Сибири // География и природные ресурсы. 2006. № 1. С. 63–70.
- Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: МГУ, 1990. 325 с.
- Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрель-2000, 1999. 768 с.
- Пономарева В.В., Николаева Т.А. Методы изучения органического вещества в торфяно-болотных почвах // Почвоведение. 1961. № 5. С. 88–95.
- Пьявченко Н.И., Корнилова Л.И. О диагностических показателях типов торфа // Почвоведение. 1978. № 10. С. 146–153.
- Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
- Сапожников А.П. Лесная подстилка — номенклатура, классификация и индексация // Почвоведение. 1984. № 5. С. 96–105.
- Тарханов С.Н. Содержание серы и тяжелых металлов в хвойных насаждениях бассейна Северной Двины при аэротехногенном загрязнении // Лесоведение. 2011. № 3. С. 26–33.
- Федорец Н.Г., Солодовников А.Н. Воздействие эмиссий Костомукшского горно-обогатительного комбината на лесные подстилки сосняков в северотаежной подзоне Карелии // Труды Карельского научного центра. 2013. № 6. С. 143–152.
- Халафян А.А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных: Учебник. 3-е изд. М.: ООО “Бином-Пресс”, 2007. 515 с.
- Щеглов А.И., Цветнова О.Б., Богатырев Л.Г. Экологическая роль лесных подстилок в миграции техногенных загрязнителей // Проблемы радиоэкологии и пограничных дисциплин. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2005. С. 248–268.
- Bao K., Wang G., Jia L., Xing W. Anthropogenic impacts in the Changbai Mountain region of NE China over the last 150 years: geochemical records of peat and altitude effects // Environmental Science and Pollution Research. 2019. V. 26. № 8. P. 7512–7524.
<https://doi.org/10.1007/s11356-019-04138-w>
- Bao K., Wang G., Pratte S., Mackenzie L., Klamt A.M. Historical variation in the distribution of trace and major elements in a poor fen of Fenghuang Mountain, NE China // Geochemistry International. 2018. V. 56. № 10. P. 1003–1015.
- Ernst W.H.O. Evolution of metal tolerance in higher plants // Forest Snow & Landscape Research. 2006. V. 80. № 3. P. 251–274.
- Fiakiewicz-Kozie B., Smieja-Król B., Palowski B. Heavy metal accumulation in two peat bogs from southern Poland // Studia Quaternaria. 2011. V. 28. P. 17–24.
- Jia L., Wang G., Liu J. Distribution and implications of the elements of peat profiles in the Jinbei bog of the Changbai Mountains // Wetland Sci. 2006. № 4. P. 187–192. (in Chinese with English abstract)
- Mayer P.M. Ecosystem and decomposer effects on litter dynamics along an old field to old-growth forest successional gradient // Acta Oecologica. 2008. V. 33. № 2. P. 222–230.
- Maestri E., Marmiroli M., Visioli G., Marmiroli N. Metal tolerance and hyperaccumulation: Costs and trade-offs between traits and environment // Environmental and Experimental Botany. 2010. V. 68. № 1. P. 1–13.
- Orru H., Orru M. Sources and distribution of trace elements in Estonian peat // Global and Planetary Change. 2006. V. 53. P. 249–258.
- Rausch N., Nieminen T., Ukonmaanaho L., Le Roux G., Krachler M., Cheburkin A.K., Bonani G., Shotyk W. Comparison of atmospheric deposition of copper, nickel, cobalt, zinc, and cadmium recorded by Finnish peat cores with monitoring data and emission records // Environmental Science and Technology. 2005. V. 39. P. 5989–5998.
- Shotyk W. Natural and anthropogenic enrichments of As, Cu, Pb, Sb, and Zn in ombrotrophic versus minerotrophic peat bog profiles, Jura Mountains, Switzerland // Water Air Soil Pollut. 1996. V. 90. P. 375–405.
- Sofo A., Scopa A., Remans T., Vangronsveld J., Cuypers A. Biochemical and functional responses of *Arabidopsis thaliana* exposed to cadmium, copper and zinc // The plant family Brassicaceae: contribution towards phytoremediation. 2012. V. 21. P. 239–263.

Geochemical Peculiarities of the Peat Litter's Morphometric Fractions in the Swamp Birch Forests of Western Siberia's Southern Taiga

T. T. Efremova^{1, *}, S. P. Efremov¹, and A. F. Avrova¹

¹Forest Institute of the Siberian Branch of the RAS, Akademgorodok, 50, bldg. 28, Krasnoyarsk, 660036 Russia

*E-mail: efr2@ksc.krasn.ru

Peat litter of moss-woody composition was studied in swamp birch (*Betula pubescens* Ehrh.) forests of the grass-mossy forest types in the northern part of the Ob and Tom interfluvium (geographical coordinates N 56°23'18", E 84°32'51"). The litter samples are characterized by a low base saturation of 35.6%; an acid reaction (pH_{H₂O} 4.0); and an ash content of 8.9%. The average content of macro- and microelements forms the following descending series, mg/kg: Ca₅₁₀₅ > Fe₄₂₀₁ > Al₃₆₁₄ > K₉₈₆ > Mg₈₉₃ > Mn₄₆₈ > Sr₂₃₀ > Na₁₅₃ > Zn₅₁ > Pb₁₃ > Cu_{6.8} > Ni₅ > Cr_{4.6} > Co_{2.9} > Cd_{0.2}. According to the factor analysis, the mineral component composition of the litter during the plant residues destruction is 57% determined by the variability of the heavy metals content, 37% by the content of alkali, alkaline earth, Zn and Cd. Using the tree clustering method, the morphometric fractions of plant fragments (derivatives) were organized as follows: >10 mm, [(10–5) + (5–3) + (3–2) + (2–1)] and [(1–0.5) + (0.5–0.25) + <0.25] mm. Discriminant analysis showed 100% fit in the corresponding group. Al and Ca make the greatest contribution to the prediction. As plant fragments decompose, heavy metals and aluminium gradually accumulate while alkali and alkaline earth metals get washed away, the processes being most active at the fermentation stage. The distribution of mineral components in litter derivatives is consistent with their humus state. In small morphometric fractions, compared to large fragments, the ratio (ΣHA + ΣFA)/polysaccharides expands, the C/N value gets lower, humic and fulvic acids accumulation occurs mainly for the 1st fraction ones. Peat litter is characterized by an average, moderately dangerous level of pollution: the total pollution index (Zc) is 18. The toxicants composition is dominated by Pb and Zn – chemical elements of the hazard class I.

Keywords: mesotrophic birch forests, derivatives, macro- and microelements, humus state, total pollution index, multivariate statistical analysis.

REFERENCES

- Agrokhimicheskie metody issledovaniya pochv* (Agrochemical techniques of soil studies), Moscow: Nauka, 1975, 656 p.
- Aleksandrova L.N., *Organicheskoe veshchestvo pochvy i protsessy ee transformatsii* (Organic matter of soils and the soil transformation), Leningrad: Nauka, 1980, 287 p.
- Bao K., Wang G., Jia L., Xing W., Anthropogenic impacts in the Changbai Mountain region of NE China over the last 150 years: geochemical records of peat and altitude effects, *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, Vol. 26, No. 8, pp. 7512–7524.
<https://doi.org/10.1007/s11356-019-04138-w>
- Bao K., Wang G., Pratte S., Mackenzie L., Klamt A.M., Historical variation in the distribution of trace and major elements in a poor fen of Fenghuang Mountain, NE China, *Geochemistry International*, 2018, Vol. 56, No. 10, pp. 1003–1015.
- Bernatonis V.K., Arkhipov V.S., Zdvizhkov M.A., Preis Y.I., Tikhomirova N.O., *Geokhimiya rastenii i torfov Bol'shogo Vasyuganskogo bolota. Bol'shoye Vasyuganskoye boloto. Sovremennoye sostoyaniye i protsessy razvitiya* (Geochemistry of plants and peat in the Great Vasyugan swamp. Big Vasyugan swamp. Current state and development processes), Tomsk: Institut optiki atmosfery SO RA, 2002, pp. 204–215.
- Beznosikov V.A., Lodygin E.D., Kondratenok B.M., Assessment of background concentrations of heavy metals in soils of the Northeastern part of European Russia, *Eurasian Soil Science*, 2007, Vol. 40, No. 9, pp. 949–955.
- Bogatyrev L.G., Alyabina I.O., Marechek M.S., Samsonova V.P., Kirichenko A.V., Konovalov S.N., Podstilka i gumusobrazovanie v lesnykh formatsiyakh Kamchatki (Litter and Humus Formation in Forests of Kamchatka), *Lesovedenie*, 2008, No. 3, pp. 28–38.
- Bogatyrev L.G., Demin I.I., Matyshak G.V., Sapozhnikova V.A., O nekotorykh teoreticheskikh aspektakh issledovaniya lesnykh podstilok (On some theoretical aspects of studying forest litters), *Lesovedenie*, 2004, No. 4, pp. 17–30.
- Bogush A.A., Bobrov V.A., Klimin M.A., Bychinskii V.A., Leonova G.A., Krivonogov S.K., Kondrat'eva L.M., Preis Y.I., Osobennosti formirovaniya otlozhenii i kontsentrirvaniya elementov v profile torfyani Vaydrinskii (Yuzhnoye Pribaikal'e) (Sedimentation and Accumulation of Elements in the Vydrino Peat Bog (southern Baikal region)), *Geologiya i geofizika*, 2019, Vol. 60, No. 2, pp. 194–208.
- Efremova T.T., Avrova A.F., Efremov S.P., Melent'eva N.V., Stages of litter transformation in bog birch forests, *Eurasian Soil Science*, 2009, Vol. 42, No. 10, pp. 1120–1129.
- Efremova T.T., S.P. E., Ecological and geochemical assessment of heavy-metal and sulfur pollution levels in hilly peatbogs of Southern Taimyr, *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, Vol. 7, No. 6, pp. 685–693.
- Ernst W.H.O., Evolution of metal tolerance in higher plants, *Forest Snow & Landscape Research*, 2006, Vol. 80, No. 3, pp. 251–274.
- Fedorets N.G., Solodovnikov A.N., Vozdeistvie emissii Kostomukshskogo gorno-obogatitel'nogo kombinata na lesnye podstilki sosnyakov v severotaezhnoi podzone Karelii (Impact of the Kostomuksha mining and processing plant emissions on the forest litters in pine forests of the Northern taiga subzone of Karelia), *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra*, 2013, No. 6, pp. 143–152.

- Fiakiewicz-Kozie B., Smieja-Król B., Palowski B., Heavy metal accumulation in two peat bogs from southern Poland, *Studia Quaternaria*, 2011, Vol. 28, pp. 17–24.
- GOST 17.4.1.02-83. *Okhrana prirody. Pochvy. Klassifikatsiya khimicheskikh veshchestv dlya kontrolya zagryazneniya* (Protection of Nature. Soils. Classification of chemicals for pollution control), Moscow: Standartinform, 2008, 4 p.
- Inisheva L.I., Tsybukova T.N., Ekologo-geokhimicheskaya otsenka torfov yugo-vostoka Zapadno-Sibirskoi ravniny (Ecological and geochemical assessment of peat in the southeast of the West Siberian Plain), *Geografiya i prirodnye resursy*, 1999, No. 1, pp. 45–51.
- Jia L., Wang G., Liu J., Distribution and implications of the elements of peat profiles in the Jinbei bog of the Changbai Mountains, *Wetland Sci*, 2006, No. 4, pp. 187–192. (in Chinese with English abstract)
- Khalafyan A.A., *STATISTICA 6. Statisticheskii analiz danykh* (STATISTICA 6. Statistic analysis of data), Moscow: OOO “Binom-Press”, 2007, 515 p.
- Kim D.-O., M’yuller C.U., Klekka U.R., Oldenderfer M.S., Bleshfild R.K., *Faktornyi, diskriminantnyi i klasternyi analiz* (Factor, discriminant and cluster analysis), Moscow: Finansy i statistika, 1989, 215 p.
- Leonova G.A., Mal’tsev A.E., Badmaeva Z.O., Shavekin A.S., Rubanov M.V., Preis Y.I., Geoekologicheskaya otsenka stepeni antropogennogo zagryazneniya tyazhelymi metallami ekosistem verkhovykh bolot lesostepnoi zony Zapadnoi Sibiri (Geoecological assessment of the degree of anthropogenic pollution by heavy metals of the ecosystems of the upper mires of the forest-steppe zone of Western Siberia), *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva*, 2018, No. 2(102), pp. 64–73.
- Lesnoi fond Rossii* (Forest resource of Russia), Moscow: VNIITslesresurs, 1999, 650 p.
- Lipatov D.N., Shcheglov A.I., Manakhov D.V., Karpukhin M.M., Zavgorodnyaya Y.A., Tsvetnova O.B., Distributions of heavy metals and benzo[a]pyrene in oligotrophic peat soils and peat gleyzems of Northeastern Sakhalin, *Eurasian Soil Science*, 2018, Vol. 51, No. 5, pp. 518–527.
- Maestri E., Marmiroli M., Visioli G., Marmiroli N., Metal tolerance and hyperaccumulation: Costs and trade-offs between traits and environment, *Environmental and Experimental Botany*, 2010, Vol. 68, No. 1, pp. 1–13.
- Mayer P.M., Ecosystem and decomposer effects on litter dynamics along an old field to old-growth forest successional gradient, *Acta Oecologica*, 2008, Vol. 33, No. 2, pp. 222–230.
- Melent’eva N.V., *Pochvy osushennykh lesnykh bolot* (Soils of the drained forest mires), Novosibirsk: Nauka, 1980, 128 p.
- Moskovchenko D.V., Biogeokhimicheskie osobennosti verkhovykh bolot Zapadnoi Sibiri (Biogeochemical properties of the high bogs in Western Siberia), *Geografiya i prirodnye resursy*, 2006, No. 1, pp. 63–70.
- Orlov D.S., *Gumusovye kisloty pochv i obshchaya teoriya gumifikatsii* (Soil humic acids and the general theory of humification), Moscow: Izd-vo MGU, 1990, 325 p.
- Orru H., Orru M., Sources and distribution of trace elements in Estonian peat, *Global and Planetary Change*, 2006, Vol. 53, pp. 249–258.
- Perel’man A.I., Kasimov N.S., *Geokhimiya landshafta* (Landscape geochemistry), Moscow: Astreya-2000, 1999, 768 p.
- Ponomareva V.V., Nikolaeva T.A., *Metody izucheniya organicheskogo veshchestva v torfyano-bolotnykh pochvakh* (Methods for studying organic matter in peat-bog soils), *Pochvovedenie*, 1961, No. 5, pp. 88–95.
- P’yavchenko N.I., Kornilova L.I., O diagnosticheskikh pokazatelyakh tipov torfa (About diagnostic indicators of peat types), *Pochvovedenie*, 1978, No. 10, pp. 146–153.
- Rausch N., Nieminen T., Ukonmaanaho L., Le Roux G., Krachler M., Cheburkin A.K., Bonani G., Shotyk W., Comparison of atmospheric deposition of copper, nickel, cobalt, zinc, and cadmium recorded by Finnish peat cores with monitoring data and emission records, *Environmental Science and Technology*, 2005, Vol. 39, pp. 5989–5998.
- Saet Y.E., Revich B.A., Yanin E.P., *Geokhimiya okruzhayushchei sredy* (Environmental geochemistry), Moscow: Nedra, 1990, 335 p.
- Sapozhnikov A.P., Lesnaya podstilka — nomenklatura, klassifikatsiya i indeksatsiya (Forest litter — nomenclature, classification and indexing), *Pochvovedenie*, 1984, No. 5, pp. 96–105.
- Shcheglov A.I., Tsvetnova O.B., Bogatyrev L.G., Ekologicheskaya rol’ lesnykh podstilk v migratsii tekhnogennykh zagryaznitelei (Ecological role of forest litter in the migration of technogenic pollutants), In: *Problemy radioekologii i pogranichnykh distsiplin* (Issues of radioecology and boundary disciplines), Ekaterinburg: Izd-vo Ural’skogo universiteta, 2005, pp. 248–268.
- Shotyk W., Natural and anthropogenic enrichments of As, Cu, Pb, Sb, and Zn in ombrotrophic versus minerotrophic peat bog profiles, Jura Mountains, Switzerland, *Water Air Soil Pollut*, 1996, Vol. 90, pp. 375–405.
- Sofa A., Scopa A., Remans T., Vangronsveld J., Cuypers A., Biochemical and functional responses of *Arabidopsis thaliana* exposed to cadmium, copper and zinc, *The plant family Brassicaceae: contribution towards phytoremediation*, 2012, Vol. 21, pp. 239–263.
- Tarkhanov S.N., Soderzhanie sery i tyazhelykh metallov v khvoinykh nasazhdeniyakh basseina Severnoi Dviny pri aerotekhnogennom zagryaznenii (The content of sulfur and heavy metals in soils and needles of coniferous stands under aerotechnogenic pollution in the Severnaya Dvina river basin), *Lesovedenie*, 2011, No. 3, pp. 26–33.
- Vasilevich R.S., Major and trace element compositions of hummocky frozen peatlands in the forest-tundra of Northeastern European Russia, *Geochemistry International*, 2018, Vol. 56, No. 12, pp. 1158–1172.
- Zheleznova O.S., Tobratov S.A., Rol’ rastitel’nosti v regulirovanii potokov tyazhelykh metallov v podtaezhnykh lesnykh ekosistemakh tsentra Vostochno-Evropeiskoi ravniny (The vegetation role in heavy metals fluxes regulation in the sub-taiga forest ecosystems of the center of the East-European plain), *Lesovedenie*, 2021, No. 1, pp. 11–27.