

УДК 630.114.351×631.445.12

ЗОЛЬНЫЙ СОСТАВ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ФРАКЦИЙ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ СТАДИЙ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОДСТИЛОК (НА ПРИМЕРЕ БОЛОТНЫХ БЕРЕЗНЯКОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ)

© 2022 г. Т. Т. Ефремова^а *, С. П. Ефремов^а, А. Ф. Аврова^а^аИнститут леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН,
Академгородок, 50/28, Красноярск, 660036 Россия

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

Поступила в редакцию 15.03.2022 г.

После доработки 02.06.2022 г.

Принята к публикации 30.06.2022 г.

В естественно-дренированных болотных березняках (*Betula pubescens* Ehrh.) Западной Сибири на расстоянии 0–30 и 100–140 м от русла внутриболотной речки Еловка сформировались сильно- и груборазложившиеся подстилки (географические координаты 56°23'710" с. ш., 84°34'043" в. д.). Средневзвешенное содержание металлов в сильноразложившейся подстилке: $\text{Ca}_{11515} > \text{Fe}_{8502} > \text{Al}_{8472} > \text{Mg}_{1468} > \text{K}_{1104} > \text{Sr}_{471} > \text{Na}_{200} > \text{Zn}_{65.3} > \text{Cu}_{15.6} > \text{Pb}_{12.1} \approx \text{Ni}_{12.2} > \text{Co}_{9.5} > \text{Cr}_{6.2} > \text{Cd}_{0.35}$ мг/кг. В груборазложившейся подстилке количество элементов меньше примерно в 1.5–2 раза. Поступление минеральных веществ в подстилку определяется древесным опадом и ветошью напочвенного покрова в ходе разложения, а также типом водно-минерального питания болота, приносом паводковыми водами осаждаемого материала и аэрозольными выпадениями. Зольный состав морфометрических фракций сильно варьирует ($C_v - 29-47\%$) и обусловлен содержанием R_2O_3 и микроэлементов на 63% в сильноразложившейся и на 84% в груборазложившейся подстилке. По мере дробления растительных фрагментов происходит последовательная аккумуляция Fe, Al и микроэлементов в форме нерастворимых органо-минеральных комплексов в процессе сопутствующей гумификации; поэтапный (преимущественно на стадии ферментации) вынос оснований, предположительно в виде гидрокарбонатов в результате активного образования CO_2 . Морфометрические фракции каждого типа подстилок по зольному составу объединились в 3 кластера, характеризующие стадии трансформации минерального компонента. Формализованные объединения соотносятся с визуальным расчленением подстилок на подгоризонты и характеризуют их размерный ряд: L – >5, F – 5–1, H – 1 – <0.25 мм в сильноразложившейся подстилке крапивно-лабазниковых березняков и соответственно >10, 10–5, 1 – <0.25 мм в груборазложившейся подстилке осоково-вейниковых березняков. Объективным признаком стадий метаморфоза подстилок служит количество Fe, ранжиры которого на каждом этапе преобразования адекватны примерно двукратному увеличению относительно исходного содержания.

Ключевые слова: классификация подстилок, растительные фрагменты, этапы трансформации подстилок, многомерный статистический анализ

DOI: 10.31857/S0032180X2211003X

ВВЕДЕНИЕ

Подстилка – генетический органогенный горизонт лесных почв, который необходимо рассматривать как одно из главнейших биогенетических образований, способствующих возобновлению роста и производительности лесных насаждений [12, 13]. В лесных местообитаниях подстилка, являясь функцией древостоя и типа лесорастительных условий, одновременно выступает связующим звеном в биологическом круговороте элементов минерального питания и активным фактором современного почвообразования, которое во многом определяется продолжитель-

ностью закрепления химических элементов и скоростью их высвобождения в процессе трансформации органических остатков. При изучении химического состава подстилок разных типов леса и условий произрастания (преимущественно автоморфных) установлено активное накопление Fe, Al, Si, менее выраженное – щелочных, щелочноземельных металлов, N, P, показана высокая удерживающая способность в отношении техногенных аэрозольных выпадений [21]. Наименее изученными с этих позиций являются подстилки в лесных сообществах, формирующихся в пределах болотных массивов. Минерализация и гуми-

фикация лесного опада в условиях гидроморфных местообитаний чаще всего рассматривается в границах верхнего (торфогенного) слоя залежи; подстилка, как правило, в самостоятельный горизонт не вычленяется.

Болота — важный биогеохимический барьер (окислительно-восстановительный, кислотнo-основной, гумусовый, сорбционный, механический), поэтому геохимическое датирование торфяников в последние десятилетия широко используют для оценки воздействия аэрозольных техногенных выбросов и понимания самоочищающей способности экосистем [2, 5, 6, 10, 15, 17, 26, 29, 32–35, 37–39]. К числу важнейших показателей, в наибольшей степени отражающих современные процессы, относится строение подстилки [4]. Формирование подгоризонтов обусловлено не только последовательной деструкцией растительного материала по размерам фракций, но и физико-химической и биохимической трансформацией. Направленность преобразования (стадии) выявляется при сравнительном изучении химического состава растительных фрагментов соподчиненных горизонтов подстилки. Выполненных в таком ключе исследований немного [24, 26].

Цель работы — оценить в подстилках болотных березняков эффективность различных процессов разложения — фрагментации, накопления и выщелачивания элементов в процессе деструкции, а также статистически обосновать стадии трансформации в виде размерного ряда и химического состава, выделить из совокупности зольных элементов достоверный признак стадий преобразования.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучали один из самых крупных лесоболотных массивов междуречья Оби и Томи общей площадью около 2,3 тыс. га, образованный группой гидравлически связанных торфяных болот. Непосредственным объектом исследования стало Большое Еловочное болото. В своей верхней (истоковой) части оно контактирует с крупной плащевой системой олиготрофных и олиго-мезотрофных Цыгановых болот. Воды, собираемые этой системой, сбрасываются в гипсометрически нижележащее Большое Еловочное болото, в водном питании которого участвуют также слабоминерализованные почвенно-грунтовые воды и атмосферные осадки. Торфяной массив пронизан сетью водотоков, обеспечивающих естественный дренаж. Стержневым элементом внутриболотной, локально обособленной гидрографической сети, является речка Еловка, русло которой окаймляют насаждения березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.).

Исследования выполнены в пределах экологического профиля 270 × 50 м, заложенного пер-

пендикулярно руслу внутриболотной речки (географические координаты 56°23.710' с. ш., 84°34.043' в. д.). Профиль, разбитый на участки 10 м, объективно на основе физико-химических показателей и водного режима почв сгруппирован в кластеры с учетом удаления от русла реки на расстоянии 0–30, 30–70, 70–100, 100–140, 140–190, 190–230, 230–270 м. В кластерах (экологических рядах) наблюдается ярко выраженная смена доминирующих растительных группировок от высокоотравных до сфагновых гидрофитных (рис. 1с). В сукцессионном ряду напочвенного покрова березняков выделено 6 типов подстилок (сильно-разложившаяся, среднеразложившаяся, грубо-разложившаяся (корневишная), торфянистая, оторфованная, торфяная) и установлено направление их чередования. Подробная морфолого-генетическая характеристика подстилок приведена ранее [9].

Настоящее сообщение посвящено сильно- и грубо-разложившимся подстилкам на расстоянии 0–30 и 100–140 м от береговой линии. В соответствии с преобладающими процессами преобразования органических остатков, сильно-разложившуюся подстилку следует отнести к гумифицированному типу, грубо-разложившуюся — к ферментативному [3]. По классификации [8, 20], подстилки образуются на почвах переходного (мезотрофного) типа, сформированных на мощных осоковых и осоково-сфагновых торфах (450–500 см). Верхний (корненасыщенный) слой торфяных почв в пределах 0–30 см характеризуется зольностью 16.6–18.7%, кислой реакцией pH_{H_2O} 4.5–4.9, степенью насыщенности обменными основаниями ($Ca^{2+} + Mg^{2+}$), равной 39.2–54.1%, рыхлым сложением — плотность почв 0.12–0.17 г/см³. Вглубь болотного массива олиготрофность почв нарастает.

В прирусловой зоне на расстоянии 0–30 м от береговой линии сформировался крапивно-лабазниковый тип леса. Уровень грунтовых вод в теплый период года составлял в среднем 40 см, варьируя от 33 до 59 см. Доминантами в составе напочвенного покрова выступают крапива двудомная (*Urtica dioica* L.), лабазник вязолистный (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim.), страусник чернокоренный (*Matteuccias truthiopteris* (L.) Tod). В этих условиях формируется полнопрофильная древесно-крупнотравная сильно-разложившаяся подстилка. Мощность подстилки по каждому из четырех лет наблюдений составляла в среднем от 4.8 до 6.7 см (среднее за четыре года 5.8 ± 0.2), коэффициент вариации по годам — преимущественно средний (14–22%). Морфолого-генетическое строение подстилки в среднем: $L_{1.7}-F_{2.7}-H_{1.4}$ (нижний индекс — мощность подгоризонта, см). Запасы органического вещества изменялись в пределах 4.1–4.9 кг/м² (среднее 4.6 ± 0.7 кг/м²),

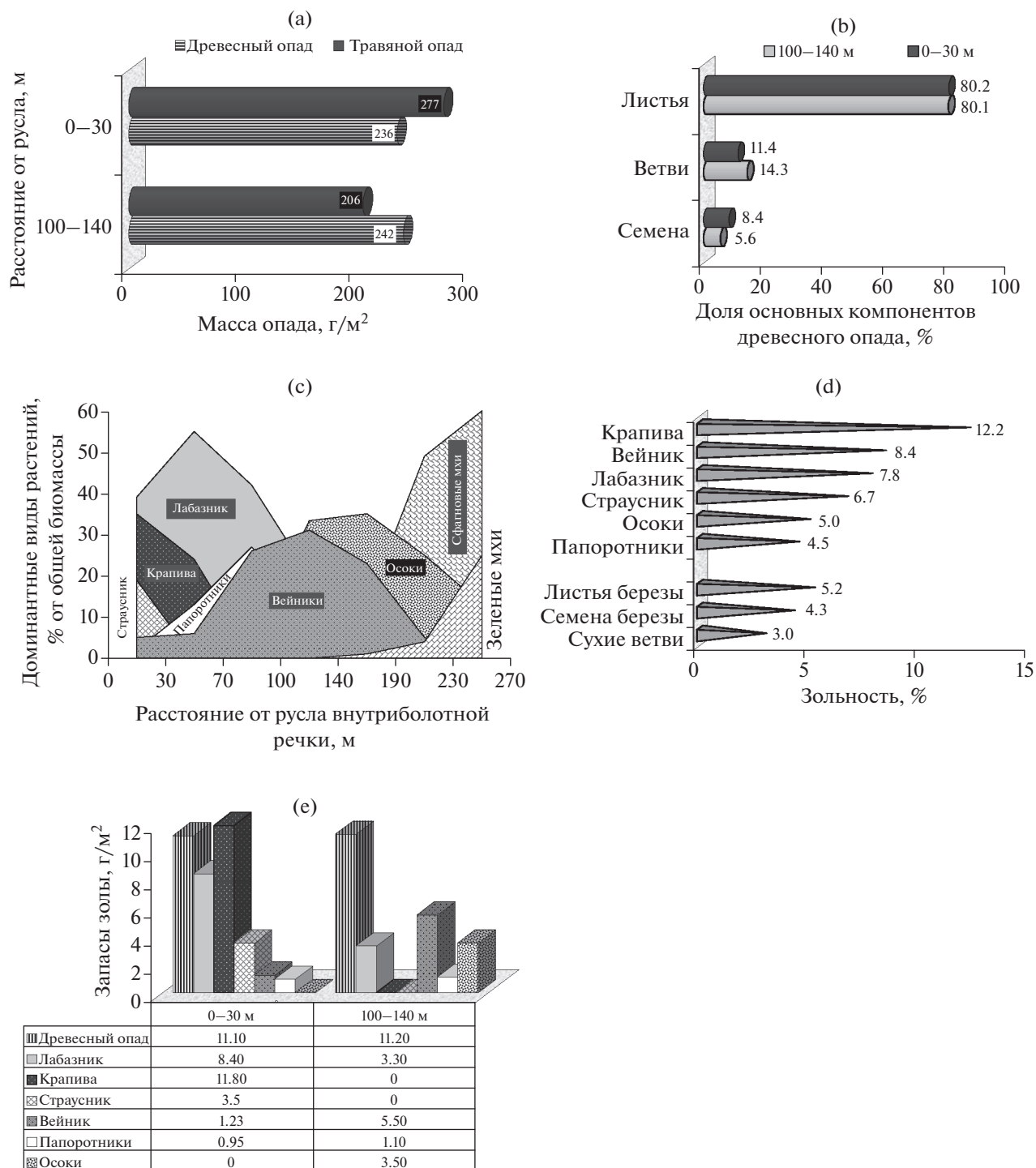


Рис. 1. Компоненты лесного опада (а), состав древесных (б), травянистых (с) остатков, зольность (д) и запасы (е) минеральных компонентов в древесном опаде и видах травянистых растительных остатков.

варьирование среднее и сильное (коэффициент вариации (C_v) 18–30%). Подстилка характеризуется кислой реакцией среды (pH_{H_2O} 5.00 ± 0.03), насыщенность основаниями $61.9 \pm 0.5\%$, что соответствует мезотрофному экологическому ряду развития торфяных почв и залежей [20].

На расстоянии 100–140 м от русла в условиях древней заторфованной ложбины стока (талъвега) уровень грунтовых вод составлял в среднем 12 см и изменялся от 3 до 30 см. В этих условиях увлажнения сформировался осоково-вейниковый березняк. В напочвенном покрове лабазник вяза-

лиственный, доминируют – вейник пурпуровый (*Calamagrostis purpurea* (Trin.) Trin.s.l.), осоки: дву-тычинковая (*Carex diandra* Schrank), сближенная (*C. appropinquata* Schum.), волосистоплодная (*C. lasiocarpa* Ehrh.), дернистая (*C. caespitosa* L.). В данном типе березняка сформировалась среднемошная, рыхлая, древесно-осоково-вейниковая груборазложившаяся (корневищная) подстилка. Ее мощность изменялась от 3.3 до 4.2 см (среднее 3.6 ± 0.1), вариабельность по годам – стабильно средняя (C_v 16%). Морфолого-генетический профиль в среднем – $L_{1.3}$ – $F_{2.3}$. Запасы подстилки составляли 1.9 – 2.6 кг/м² (среднее 2.2 ± 0.1), C_v – 16–23. Реакция среды – кислая pH_{H_2O} 4.6 ± 0.03 , насыщенность основаниями 32.2%, что соответствует олиго-мезотрофному экологическому ряду развития торфяных почв [20].

Древесный опад учитывали по 10 опадоуловителям (100 × 100 см) в первой декаде октября. Биомассу напочвенного покрова измеряли на площадках 50 × 50 см с учетом доминирующих растительных ассоциаций в 20 повторностях. Образцы подстилки отбирали шаблоном 20 × 20 см во второй половине августа (до начала массового поступления опада) в трехкратной повторности на каждой 10-метровой секции экологического профиля. На участке в 0–30 м от русла отобрано, таким образом, 9 образцов сильноразложившейся подстилки, на расстоянии 100–140 м – 12 образцов груборазложившейся. Все отобранные образцы рассеивали на ситах по морфометрическим фракциям >10 мм, 10–7, 7–5, 5–3, 3–2, 2–1, 1–0.5, 0.5–0.25, <0.25 мм. Затем трехкратные повторности каждой фракции в 10-метровых секциях объединяли. В итоге содержание макро- и микроэлементов определяли в 27 образцах размерного ряда >10...<0.25 мм сильноразложившейся подстилки и 36 – в груборазложившейся. Эти данные отражают пространственную вариабельность деструкции подстилок естественно-дренированных болотных березняков в пределах экологического профиля. Пробы болотных вод отобраны в период продолжительного весенне-летнего половодья. Взвешенные частицы водных потоков в виде илистого осадка (наилка) отбирали после схода паводка вблизи русла.

Химический анализ почв, подстилок, болотных вод и наилка выполнен по общепринятым руководствам в практике почвенных и гидрохимических исследований [25, 27]. Общее содержание макро- и микроэлементов – атомно-абсорбционным методом на спектрометре МГА-915 МД [16]. Результаты всех определений выражали в расчете на навеску, высушенную при 105°C.

Типы подстилок классифицировали по признакам, разработанным Сапожниковым [22].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание зольных элементов в подстилках.

Средневзвешенное содержание металлов значительно варьирует (в основном C_v – 29–47%) и образует следующий нисходящий ряд (подстрочным индексом возле элемента показано его содержание в расчете на единицу массы сухого вещества). Сильноразложившаяся подстилка: $Ca_{11515} > Fe_{8502} > Al_{8472} > Mg_{1468} > K_{1104} > Sr_{471} > Na_{200} > Zn_{65.3} > Cu_{15.6} > Pb_{12.1} \approx Ni_{12.2} > Co_{9.5} > Cr_{6.2} > Cd_{0.35}$ мг/кг. Груборазложившаяся подстилка: $Ca_{7622} > Fe_{5142} > Al_{3993} > Mg_{1213} > K_{1137} > Sr_{265} > Na_{172} > Zn_{58.8} > Cu_{9.6} > Pb_{8.8} > Ni_{8.1} > Co_{5.8} > Cr_{2.2} > Cd_{0.24}$ мг/кг. Градация элементов практически совпадает, однако, их количество в сильноразложившейся подстилке, как правило, больше в 1.5–2 раза. Одной из причин различного накопления минеральных элементов в подстилках крупнотравных березняков служит видовая структура напочвенного растительного покрова, что соответствует литературным данным [11, 23, 30]. Количество древесного опада, в основном листьев (80%), изменяется слабо (рис. 1a, 1b). В березняке крапивно-лабазниковом травянистые остатки высокозольных видов растений составляют 90% массы ветоши, поступающей в подстилку (рис. 1c, 1d). Количество золы (37.0 г/м²) обеспечивается вкладом напочвенного покрова на 70, древесным опадом – на 30% (рис. 1e). В березняке осоково-вейниковым почти на четверть уменьшается масса ветоши, в составе которой доминирующие виды растений характеризуются более низкой зольностью. Поступление минеральных веществ снижается (24.7 г/м²), доля травянистых остатков уменьшается до 55, древесного – возрастает до 45%. Определенный вклад в обогащение подстилок зольными элементами после схода паводка вносит наилок, о чем подробнее сказано ниже.

Зольные элементы в размерном ряду морфометрических фракций. В груборазложившейся подстилке относительно сильноразложившейся в большем количестве присутствуют самые крупные фрагменты >10 мм, в меньшем – наиболее диспергированные частицы размерностью от 1 до <0.25 мм (рис. 2a). Последовательное измельчение растительных остатков в обоих типах подстилок сопровождается возрастанием зольности и степени гумификации (рис. 2b, 2c), обусловленной увеличением содержания гуминовых и фульвокислот на фоне уменьшения содержания гемицеллюлоз и целлюлозы вследствие усиления биохимических процессов. Об этом свидетельствует сужение отношения C/N, что показано в ранее опубликованной нами работе по оценке состава органического вещества морфометрических фракций подстилок [7]. Дифференциация растительных фрагментов и сопутствующее

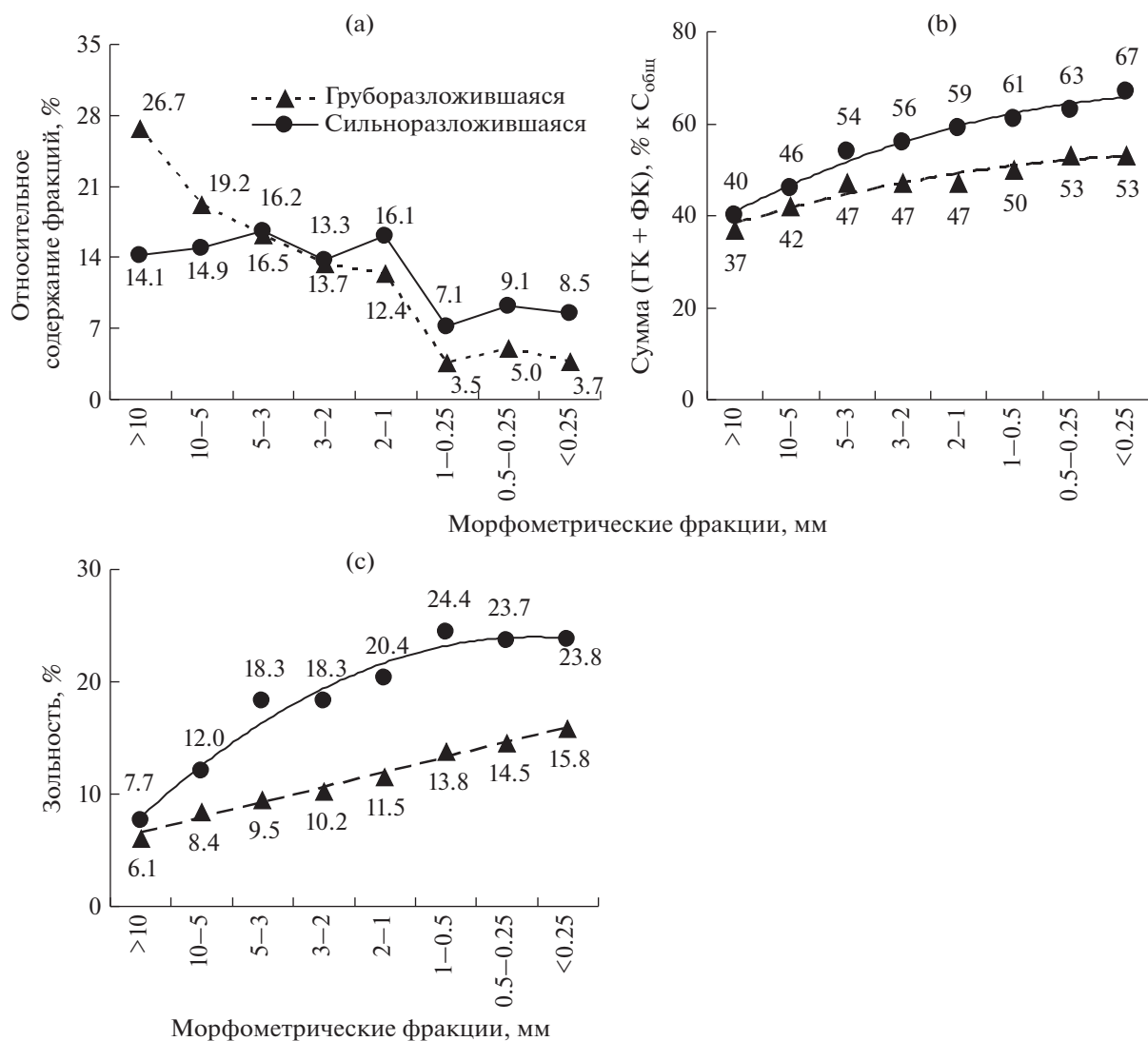


Рис. 2. Характеристика морфометрических фракций сильно- и груборазложившихся подстилок (%): (а) – относительное содержание растительных фрагментов в размерном ряду, (б) – степень гумификации, (с) – зольность.

возрастание зольности и степени гумификации сопровождается последовательным накоплением Fe, Al, Cu, Ni, Co, Cr, Pb, Cd и их максимальной концентрацией во фракциях <1 мм (рис. 3). Как известно, минеральные компоненты вступают в многообразные взаимодействия с гумусовыми кислотами, которые обуславливают образование различных по составу сложных органо-минеральных производных.

Щелочные, щелочноземельные элементы проявляют противоположную тенденцию: их количество в мелких растительных фрагментах постепенно снижается. Наиболее активный вынос отмечен для морфометрических фракций 5(10)...1 мм, вероятнее всего, за счет обильного выделения углекислого газа. При взаимодействии CO₂ с водой происходит образование анионов HCO₃⁻, которые

образуют с основаниями растворимые гидрокарбонатные соли. Более обильное выделение CO₂ во фракциях 5(10)...1 мм определяется в соответствии с представлениями Александровой [1] интенсивной потерей легкоразлагаемых углеводов и протеинов на начальной стадии трансформации относительно лигнина, участие которого возрастает в процессах гумификации фрагментов <1 мм. Вынос металлов в наиболее гумусированных растительных фрагментах 1...<0.25 мм несколько замедляется, очевидно, за счет формирования некоторой части нерастворимых гуматов. Гуматы кальция очень плохо растворимы в воде при любых значениях pH, фульвокислоты также дают нерастворимые осадки с двухвалентными катионами в определенных диапазонах pH, однако существует большой разброс найденных параметров [1, 18].

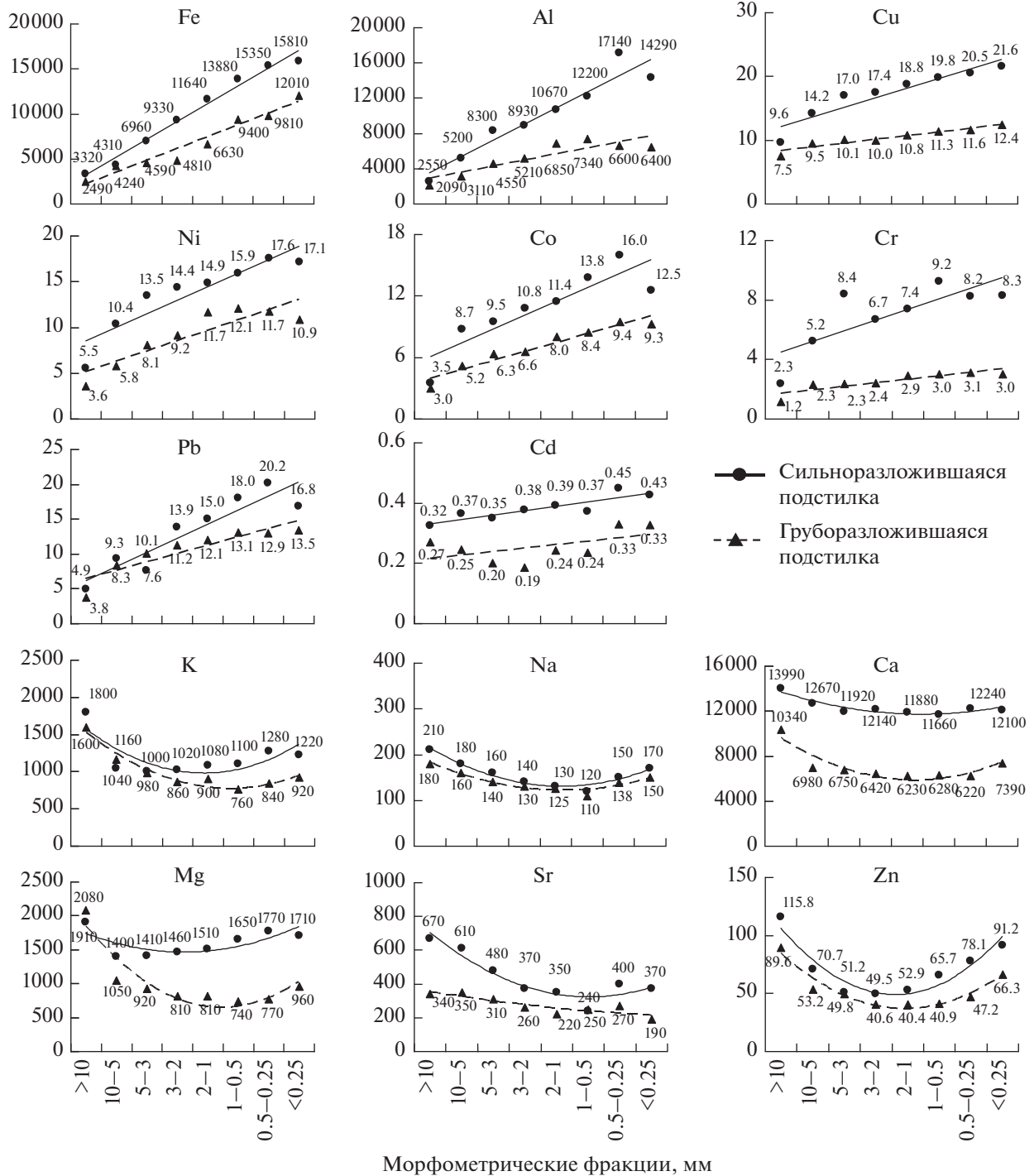


Рис. 3. Содержание (%) зольных элементов в морфометрических фракциях сильно- и груборазложившихся подстилок – Fe, Al, Cu, Ni, Co, Cr, Pb, Cd, K, Na, Ca, Mg, Sr, Zn, мг/кг.

Аналогичным образом ведет себя цинк, который имеет постоянную валентность Zn^{2+} , характеризуется высокой биофильностью, почти сравнимой с K и Ca, и способен, подобно щелочноземельным металлам, образовывать органо-минеральные комплексы с гуминовыми и фульвокислотами [19].

Небольшое увеличение концентрации калия во фракциях 0.5...<0.25 мм, вероятнее всего, определяется вкладом физиологически активных сосущих корней диаметром <1 мм, которые интенсивно поглощают более доступные формы калия. Учитывая объективную невозможность их удале-

Таблица 1. Факторная структура взаимосвязей макро- и микроэлементов морфометрических фракций подстилок

Элемент	Сильноразложившаяся подстилка				Грубобразложившаяся подстилка		
	выделенные факторы						
	1	2	3	4	1	2	3
Cu	0.94*	-0.27	-0.17	0.10	0.88*	0.38	0.25
Zn	-0.17	0.93*	0.20	-0.07	-0.15	-0.96*	-0.22
Ni	0.94*	-0.32	-0.12	0.07	0.51	0.52	0.67
Pb	0.95*	-0.09	0.15	-0.01	0.75*	0.57	0.32
Co	0.93*	-0.29	0.16	0.10	0.85*	0.40	0.33
Cr	0.79*	-0.44	-0.17	0.39	0.77*	0.58	0.23
Cd	0.93*	0.01	0.14	-0.31	-0.26	0.54	0.04
Fe	0.98*	0.05	-0.10	0.09	0.99*	0.11	0.10
Sr	-0.45	0.15	-0.61	-0.62	0.17	0.31	0.11
Al	0.98*	-0.03	0.01	0.09	0.72*	0.54	0.42
K	-0.30	0.93*	0.11	-0.06	-0.51	-0.14	-0.12
Na	0.49	0.45	-0.24	-0.03	0.10	0.21	-0.09
Ca	-0.66	0.66	0.22	-0.27	-0.36	-0.91*	-0.19
Mg	0.16	0.96*	0.14	0.07	-0.47	-0.85*	-0.21
Собственные значения факторов	8.83	3.61	0.95	0.27	8.44	1.19	0.24
% от общей дисперсии	63	26	7	2	84	12	2
Накопленный % от общей дисперсии	63	89	96	98	84	96	98

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

ния из субстрата подстилок, при подготовке образцов подстилки к анализу удаляли только опорные и проводящие корни. Тенденция некоторого увеличения содержания натрия скорее всего имеет ту же причину, что и для калия.

Многомерный статистический анализ связи зольных элементов и морфометрических фракций подстилок. Содержание макро- (Fe, Al) и микроэлементов в подстилках в большинстве случаев статистически достоверно положительно коррелирует ($r = 0.71-0.98$). Аналогичные связи между собой проявляют также щелочные и щелочноземельные металлы ($r = 0.87-0.99$). Положительные корреляции обусловлены особенностями водно-минерального питания болотных березняков, биогенной аккумуляцией элементов и, вероятно, их поступлением в составе техногенных выбросов, как показывают и другие авторы [15]. При этом тяжелые металлы и основания, как правило, имеют тесную отрицательную связь ($r = -0.71...-0.96$).

С целью редукции переменных для последующей статистической обработки данных выполнили факторный анализ, основная идея которого – объединение коррелированных переменных и выделение скрытых общих факторов, объясняю-

щих связи между наблюдаемыми признаками. Произвольно задали 5 выделяемых факторов; при этом можно указывать любое число, не превышающее количество переменных [28]. Применили метод поворота осей (варимакс), который позволяет получить интерпретируемое решение каждого фактора, максимизируя дисперсии квадратов исходных факторных нагрузок по переменным. В соответствии с критерием Кайзера, целесообразность отбора числа факторов определяется собственными числами, значения которых больше 1 [14]. На этом основании ограничились двумя факторами в каждом типе подстилок (табл. 1). В сильноразложившейся фактор 1 статистически значимо коррелирует с Fe, Al и микроэлементами, фактор 2 – K, Mg, Zn. Первый объясняет 63%, второй 26% общей дисперсии, накопленная доля составляет 89%. В грубобразложившейся подстилке связь факторов с набором химических элементов практически повторяется. Фактор 1 объясняет 84%, фактор 2 – 12%, накопленная доля объясненной дисперсии – 96%. Исходя из доли объясненной дисперсии фактором 1, специфика минерального состава морфометрических фракций определяется главным образом содержанием Fe, Al и микроэлементов.

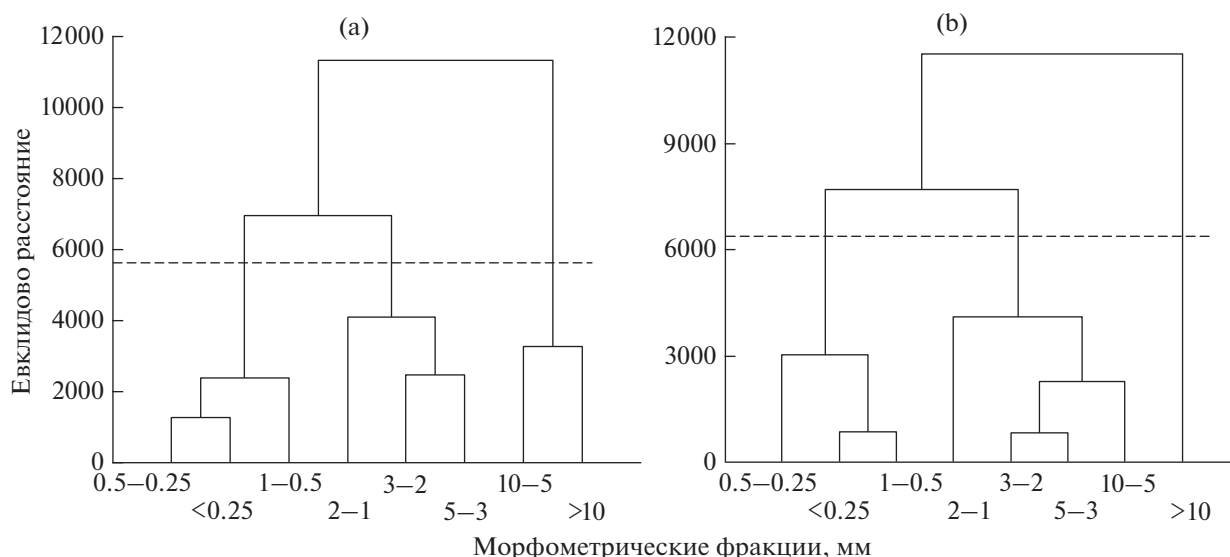


Рис. 4. Дендрограммы объединения морфометрических фракций: сильноразложившаяся (а) и груборазложившаяся (б) подстилка.

По содержанию зольных элементов морфометрические фракции подстилок структурировали в группы схожих объектов, применив алгоритмы кластеризации. На дендрограмме каждого типа подстилок четко выделилось по 3 кластера (рис. 4а, 4б). Различия касаются в основном крупных фрагментов. В груборазложившейся подстилке фракция >10 мм обособилась в самостоятельный кластер, в сильноразложившейся – фракции >10 и 10–5 мм объединились в одну группу. Статистическая оценка сгруппированных морфометрических фракций по факторам 1 и 2 (редуцированным зольным элементам) выполнена методом дискриминантного анализа (табл. 2). Построенная модель, судя по F -критерию и p -уровню значимости, свидетельствуют о неравенстве средних кластеров в сильноразложившейся подстилке по двум факторам, в груборазложившейся – только по фактору 1. Итоговый результат правильно предсказанных случаев составляет 76% (табл. 3).

Морфология кластеров морфометрических фракций как отражение дискретных стадий преобразования подстилок. Статистически обоснованный линейный ряд фракций по зольному составу соответствует ассоциации их весовых долей в размерном ряду >5, 5(10)...1, 1...<0.25 мм (рис. 1а). Морфологический облик сгруппированных растительных фрагментов не противоречит общепризнанным критериям визуального расчленения подстилок на подгоризонты L – листовой, F – ферментативный, Н – гумусированный.

Сильноразложившаяся подстилка

Кластер >10...5 мм морфологически соответствует листовому подгоризонту L. Доля в общей массе подстилки составляет 29%. Рыхлый, губчатого сложения. Окраска – светло-бурая. Листья березы – 60–80%, стебли трав – 10–20%, веточки, осколки древесины, коры. Обильно грибной мицелий.

Таблица 2. Оценка статистической значимости факторов взаимосвязанных зольных элементов, дискриминирующих кластеры морфометрических фракций подстилок

Переменные модели	Сильноразложившаяся подстилка				Груборазложившаяся подстилка			
	лямбда Уилкса	частная лямбда	F -критерий	p -уровень	лямбда Уилкса	частная лямбда	F -критерий	p -уровень
	качество модели: лямбда Уилкса – 0.21, F -критерий – 12.0, p -уровень <0.001				качество модели: лямбда Уилкса – 0.42, F -критерий – 5.4, p -уровень <0.001			
Фактор 1	0.98	0.21	37.68	<0.001	0.97	0.43	12.99	<0.001
Фактор 2	0.34	0.61	6.48	0.007	0.47	0.89	1.24	0.311

Таблица 3. Межгрупповые различия средних кластеров морфометрических фракций подстилок

Кластеры морфометрических фракций, мм	Квадраты расстояний Махаланобиса, <i>p</i> -уровни			Матрица классификации			
	>10–5	5–1	1–<0.25	% попаданий	число попаданий		
					>10–5	5–1	1–<0.25
Сильноразложившаяся подстилка							
>10–5	–	8.3	22.0	67	6	3	0
5–1	<0.001	–	3.4	78	1	7	1
1–<0.25	<0.001	0.004	–	78	0	2	7
				Итоги классификации:			
				75	7	12	8
Груборазложившаяся подстилка							
Кластеры морфометрических фракций, мм	>10	10–1	1–<0.25	% попаданий	число попаданий		
					>10	10–1	1–<0.25
>10	–	5.6	12.4	75	3	1	0
10–1	0.007	–	1.4	85	0	17	3
1–<0.25	<0.001	0.046	–	67	0	4	8
				Итоги классификации:			
				76	3	22	11

Примечание. Квадраты расстояний Махаланобиса – над чертой, *p*-уровни значимости различий – под чертой.

Кластер 5...1 мм. Соответствует ферментативному слою F. Доля в общей массе подстилки – 46%. Темно-бурая сильно разложившаяся органическая масса: около половины – крупнозернистые-зернистые агрегаты гумусовой природы творожистого микростроения. Легко разрушаются. Фрагменты стеблей трав, веточек, корней, коры – не более 20%. Обильно физиологически активные корни менее 1 мм, окруженные рыхлыми гроздьями гумусовой плазмы.

Кластер 1...<0.25 мм. Сообразуется со слоем гумификации H. Доля в общей массе подстилки – 25%. Окраска сизовато-темно-бурая. Доминирует гумусовая субстанция: творожисто-мелкозернисто-порошистая (около 60%) и аморфная (примерно 30%). Обильно – живые физиологически активные корни.

Груборазложившаяся подстилка

Кластер >10мм – подгоризонт L. В общей массе подстилки составляет 27%. Рыхлый, фрагментарно – волокнистого строения. Цвет – соломенно-бурый. Обломки листьев березы (примерно 60%), листья и стебли вейников, осок (30%), тонкие ветви, кора, кусочки древесины, семенные чешуи (10%).

Кластер 10...1 мм – ферментативный подгоризонт F. В общей массе подстилки – 61%. Бурого и

темно-бурого цвета. Дернинно-ризоидно-корневой, сильно связанный, волокнистого строения. Неопределяемые растительные остатки – около 60%. Фрагменты вейников, осок (20–25%), листьев березы, тонких ветвей (10–15%). Обильно живые корни. Единично агрегаты ореховатой и плитовидной структуры гумусовой природы, механически непрочные.

Кластер 1...<0.25 мм – подгоризонт H. Выделяется только в процессе отсева на ситах. Массовая доля в подстилке – 12%. Бурая с сероватым оттенком сильноразложившаяся, однородная органическая субстанция без видимой агрегации.

Итак, подстилки четко различаются характером строения – губчатым и слоистым, а также массой гумифицированных подгоризонтов и степенью их агрегированности.

Миграция зольных элементов в кластерах морфометрических фракций. Профиль лесной подстилки – это совокупность парагенетических (взаимосвязанных происхождением) подгоризонтов, состав и морфологический облик которых соответствуют специфическим продуктам органа-минеральных взаимодействий на разных стадиях преобразования растительных остатков вследствие своеобразной направленности и интенсивности биохимических процессов. Статистическая достоверность кластеров морфометрических фракций, сгруппированных по составу

Таблица 4. Средневзвешенное содержание макро- и микроэлементов в кластерах морфометрических фракций подстилок болотных березняков, мг/кг

Химические элементы	Кластеры морфометрических фракций, мм, подгоризонты					
	>10–5 L	5–1 F	1–<0.25 H	>10 L	10–1 F	1–<0.25 H
	сильноразложившаяся подстилка			грубобразложившаяся подстилка		
	Аккумуляция элементов					
Fe	3828	9286	15086	2490	5257	10350
Al	3910	9347	14744	2090	4709	7524
Cu	11.9	17.7	20.7	7.5	10.0	11.73
Ni	8.0	14.2	16.9	3.6	9.4	11.6
Pb	7.1	12.0	18.4	3.8	10.2	13.1
Co	6.2	10.5	14.2	3.0	6.3	9.1
Cr	3.8	7.5	8.5	1.2	2.5	3.0
Cd	0.35	0.37	0.42	0.27	0.22	0.30
	Вынос элементов					
K	1410	1034	1208	1600	994	841
Na	195	143	147	180	139	133
Ca	13313	11969	12026	10340	6645	6587
Mg	1715	1459	1648	2080	915	818
Zn	92.6	51.2	79.0	89.5	46.9	51.1
Sr	639	402	344	340	293	240

зольных элементов, позволяет ассоциировать их с дискретными фазами преобразования минеральной компоненты, которые диагностируют генетическое расчленение подстилки.

Содержание Fe и Al в каждой дискретной стадии подстилок последовательно увеличивается примерно в 2 раза относительно горизонта L – условно исходного состояния (табл. 4). Так, в сильноразложившейся подстилке кластера 5...1 мм (F) содержание Fe увеличивается в 2.4 раза, кластере 1...<0.25 мм (H) в 3.9, в грубобразложившейся – соответственно в 2.1 и 4.1 раза. Микроэлементы проявляют сходную тенденцию, однако в гумусированных слоях интенсивность накопления несколько уменьшается.

Биогеохимическая миграция оснований не столь однозначна. Дифференцированный вынос элементов осуществляется главным образом из ферментативных подгоризонтов и активнее протекает в грубобразложившейся подстилке. Так, в подгоризонте F сильноразложившейся подстилки содержание Ca, Mg, Na, K уменьшается в 1.1–1.4 раза, Sr и Zn – 1.6–1.8 раз относительно листового. Соответственно в грубобразложившейся подстилке в 1.4–2.3 раза, максимально – Mg и Zn. В гумифицированных горизонтах за счет формирования некоторой части нерастворимых гуматов потери большинства оснований прекращаются, в грубобразложившейся подстилке замедляются. В

итоге кластеры 1...<0.25 мм обедняются щелочными и щелочноземельными элементами в сильноразложившейся подстилке на 3.9–14.7, грубобразложившейся – на 36–61%. В результате повышается кислотность подстилки до pH_{H_2O} 4.0 по сравнению с 5.2 в сильноразложившейся. Только Na и Sr последовательно вымываются, наиболее активно Sr.

Железо – диагностический признак преобразования подстилок болотных березняков как проявление специфических условий местообитаний. Из совокупности аналитических данных по зольному составу целесообразно выявить наиболее значимые показатели в группировке морфометрических фракций (стадий трансформации). Использовали канонический анализ, который позволяет исследовать зависимости между множествами переменных. Предварительно рассмотрели корреляции кластеров и с отдельными химическими элементами в составе факторов, значимых в дискриминации. В канонический анализ включили переменные с коэффициентом корреляции $r \geq 0.9$. В сильноразложившейся подстилке – Fe, Al, Cu, Ni, в грубобразложившейся – Fe, Cu, Pb, Sr и Co. Персональный вес K, Mg, Zn – не значим ($r = 0.17–0.28$), несмотря на достоверный совокупный вклад в дискриминацию растительных фрагментов. В обоих типах подстилок выделилось по одному каноническому корню с высо-

Таблица 5. Результаты канонического анализа зависимости кластеров морфометрических фракций подстилок и тяжелых металлов

Статистические показатели корня	Сильноразложившаяся подстилка			Груборазложившаяся подстилка		
	оценка значимости корня	переменные корня	стандартизованные коэффициенты переменных	оценка значимости корня	переменные корня	стандарти- зованные коэффициенты переменных
Каноническая корреляция, R	0.96	Cu	0.03	0.97	Cu	0.64
Канонический индекс детерминации, R^2	0.93	Ni	-0.09	0.93	Pb	-0.75
χ^2 -критерий	10.43	Fe	-0.72	10.8	Co	0.38
p -уровень значимости	0.034	Al	-0.22	0.028	Cr	-0.30
Лямбда Уилкса	0.074			0.067	Fe	-1.04
Доля объясненной дисперсии	93%			93%		

кими каноническими индексами детерминации и значимыми χ^2 -критериями (табл. 5), что свидетельствует о наличии сильной зависимости между химическими элементами и кластерами растительных фрагментов. В значении дискриминантной функции (корня) вклад каждой переменной характеризуется абсолютной величиной канонического “веса”. Наибольшую долю в дискриминацию морфометрических фракций подстилок болотных березняков вносит содержание Fe, что закономерно.

Железо – характерный элемент болот и пойменных лугов [19]. Еловочное болото в своей верхней (истоковой) части собирает в период весеннего паводка воды крупной плащевой системы олиготрофных и олиго-мезотрофных болот. Внутриболотная речка Еловка, промоины и ручьи, как правило, переполняются и сливаются в единый поток, разливаясь по площади торфяного массива. В результате изменяются окислительно-восстановительные условия, создавая своеобразную геохимическую обстановку, в которой железо проявляет себя в качестве показателя (маркера) стадий преобразования подстилок благодаря специфическому составу болотных вод. В составе катионов доминирует Fe^{2+} (рис. 5а), в составе анионов – фульвокислоты (рис. 5б), которые достоверно взаимосвязаны на 87% (рис. 6а). При взаимодействии с кислородом воздуха Fe^{2+} легко окисляется и формирует массу органо-минеральных коллоидов, которые выпадают в твердую фазу на месте своего образования. Уже в 100–140 м от русла количество Fe^{2+} в болотных водах снижается на 20%, фульвокислот – на 19%, по мере удаления от русла нарастает олиготрофность вод. Значительное количество разнообразных механических взвесей и органо-минеральных коллоидов поступает и с потоками паводковых вод. После схода паводка они выпадают в виде наилка, обогащенного катион-гумусовыми комплексами

и азотом (рис. 5с), железом и другими макро- и микроэлементами (рис. 5d, 5е). Илистый осадок распределяется по площади разлива не равномерно. Максимальное количество (1–2 см) осаждается в микрозападинах примерно в 50 м от русла р. Еловки (в условиях уменьшения скорости течения паводковых вод за счет растительности). Согласно рис. 6б, фульватно-гуматные комплексы илистого осадка и растворимые органо-минеральные соединения водного потока, обогащенные железом, обуславливают его тесную связь со степенью гумификации подстилок – в 30 м от русла на 96, в 100–140 м – на 85%. О доминирующей роли органического вещества в миграции металлов почв водно-болотных угодий свидетельствуют работы [31, 36].

Таким образом, определяющий вклад соединений железа в группировку морфометрических фракций – стадий трансформации подстилок (на примере минеральной компоненты) экспериментально и статистически обоснован. По данным табл. 4, количественные критерии диагностики соответствуют примерно двукратному увеличению содержания железа на каждом этапе преобразования относительно исходного содержания.

ВЫВОДЫ

1. Зольный состав морфометрических фракций (рассев на ситах) подстилок естественно-дренированных крупнотравных болотных березняков определяется преимущественно изменчивостью содержания Fe, Al и микроэлементов – Cu, Ni, Pb, Cr, Co, Cd. Поступление минеральных веществ в подстилку определяется спецификой зольного состава древесного опада и травянистых остатков напочвенного покрова в ходе разложения, а также типом водно-минерального питания болота, приносом паводковыми водами осаждае-

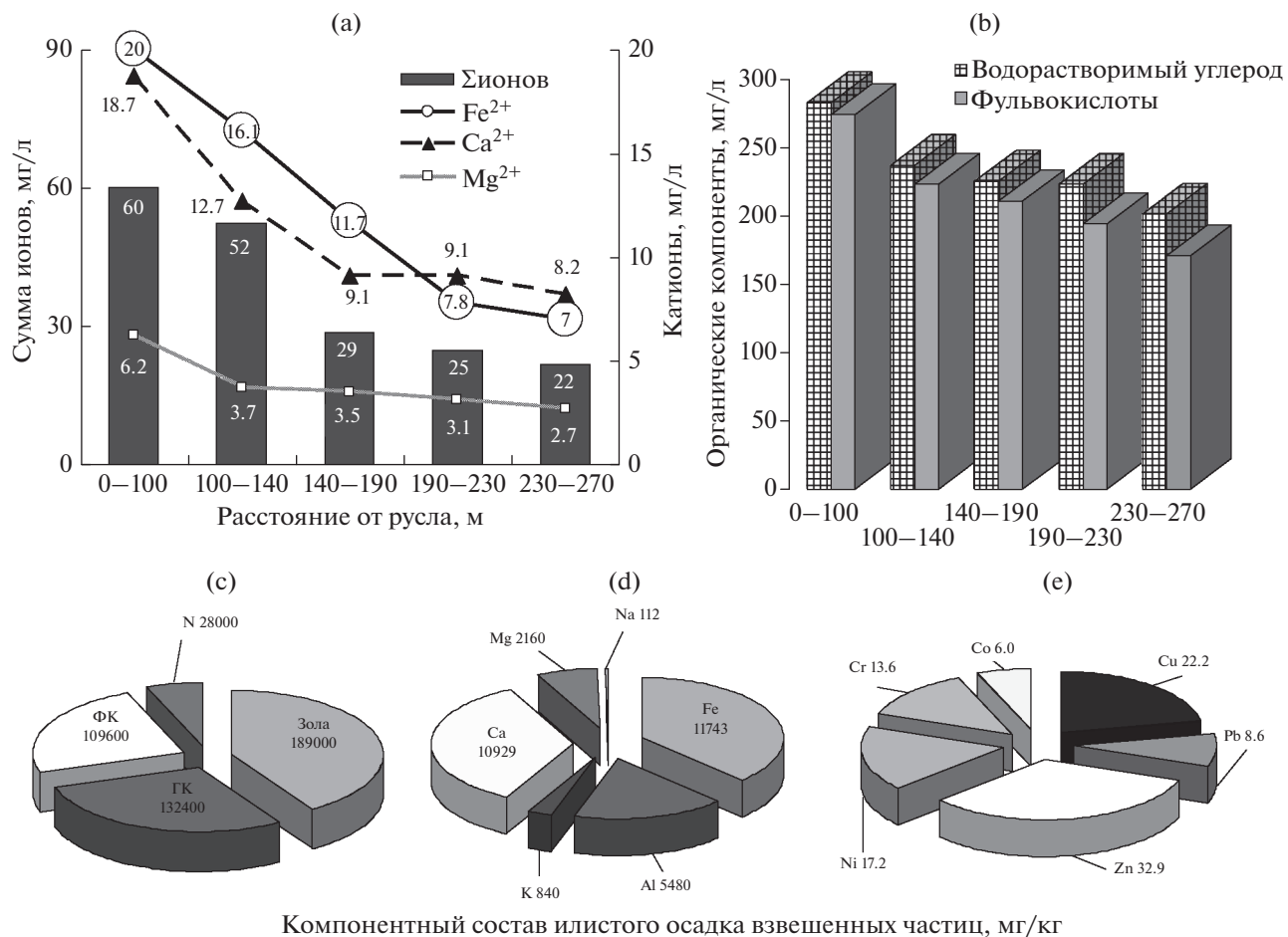


Рис. 5. Болотные воды весеннего паводка (мг/л): ионный состав (а), водорастворимый углерод и фульвокислоты (б). Илистый осадок взвешенных частиц (мг/кг): гуминовые кислоты, фульвокислоты, азот и зола (с); макро- и микроэлементы (d, e).

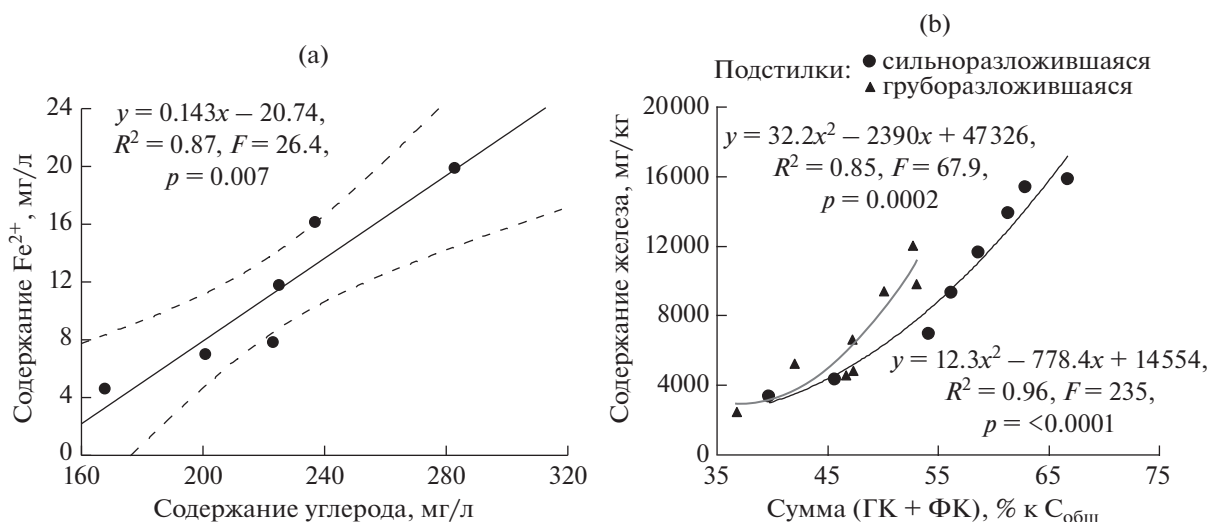


Рис. 6. Регрессионная связь железа с содержанием органического углерода гумусовой природы в болотных водах (а) и степенью гумификации подстилок (б).

мого материала и, возможно, аэрозольными выпадениями.

2. В ходе деструкции растительных остатков происходит: а) последовательная аккумуляция Fe, Al и микроэлементов, благодаря сопутствующим процессам гумификации; б) выщелачивание оснований преимущественно в ферментативных подгоризонтах, по всей вероятности, в виде гидрокарбонатов в результате возможного более интенсивного выделения CO₂ в этих подгоризонтах.

3. По содержанию зольных элементов морфометрические фракции объективно сгруппировались в три кластера, что соответствует визуальному расчленению на подгоризонты L, F, H – дискретные стадии преобразования подстилок. Итоговый результат статистически достоверно предсказанных случаев – 76%. Наибольшую долю в дискриминацию растительных фрагментов вносит количество Fe. Диагностические показатели соответствуют примерно двукратному увеличению содержания Fe относительно исходного на каждом этапе преобразования.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания “Функционально-динамическая индикация био-разнообразия лесов Сибири” № 0356-2021-0009.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Александрова Л.Н.* Органическое вещество почвы и процессы его трансформации. Л.: Наука, 1980. 288 с.
2. *Архипов В.С., Бернатонис В.К., Резчиков В.И.* Распределение железа, кобальта и хрома в торфяных залежах центральной части Западной Сибири // Почвоведение. 2000. № 12. С. 1439–1447.
3. *Богатырев Л.Г.* О классификации лесных подстилок // Почвоведение. 1990. № 3. С. 118–127.
4. *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.
5. *Богуш 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>
6. *Василевич Р.С.* Макро- и микроэлементный состав мерзлотных бугристых торфяников лесотундры европейского северо-востока России // Геохимия. 2018. № 12. С. 1158–1172. <https://doi.org/10.1134/S0016752518100126>
7. *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.
8. *Ефремова Т.Т., Аврова А.Ф.* Регрессионные модели кислотно-основных свойств торфяных болот как оперативные критерии их классификации по химическому принципу // Сибирский экологический журн. 2019. № 4. С. 397–409.
9. *Ефремова Т.Т., Ефремов С.П., Аврова А.Ф.* О сопряженности морфогенетических типов подстилок с их свойствами в болотных березняках // Почвоведение. 2010. № 8. С. 920–928.
10. *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.
11. *Ефремова Т.Т., Секретенко О.П., Аврова А.Ф., Ефремов С.П.* Геостатический анализ пространственной изменчивости запасов зольных веществ в подстилке болотных березняков Западной Сибири // Почвоведение. 2013. № 1. С. 56–66.
12. *Зонн С.В.* Биогеоценологические и генетические основы классификации лесных подстилок // Роль подстилки в лесных биогеоценозах. М.: Наука, 1983. С. 80–81.
13. *Карпачевский Л.О.* Лес и лесные почвы. М.: Лесная промышленность, 1981. С. 76–199.
14. *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.
15. *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-глееземах на северо-востоке о. Сахалин // Почвоведение. 2018. № 5. С. 551–562. <https://doi.org/10.7868/S0032180X18050040>
16. Методика измерений массовой доли ванадия, кадмия, кобальта, марганца, меди, мышьяка, никеля, ртути, свинца, хрома и цинка в пробах почв, грунтов и донных отложений методом атомно-абсорбционной спектроскопии с использованием атомно-абсорбционного спектрометра с электротермической атомизацией МГА-915 МД. М., 2009. 41 с.
17. *Московченко Д.В.* Биогеохимические особенности верховых болот Западной Сибири // География и природные ресурсы. 2006. № 1. С. 63–70.
18. *Орлов Д.С.* Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. 325 с.
19. *Перельман А.И., Касимов Н.С.* Геохимия ландшафта. М.: Астрель, 1999. 768 с.
20. *Пьявченко Н.И., Корнилова Л.И.* О диагностических показателях типов торфа // Почвоведение. № 10. 1978. С. 146–153.

21. Роль подстилки в лесных биогеоценозах. М.: Наука, 1983. 240 с.
22. Сапожников А.П. Лесная подстилка – номенклатура, классификация и индексация // Почвоведение. 1984. № 5. С. 96–105.
23. Семенюк О.В., Телеснина В.М., Богатырев Л.Г., Бенедиктова А.И., Кузнецова Я.Д. Оценка внутрибиоценозной изменчивости лесных подстилок и травяно-кустарничковой растительности в еловых насаждениях // Почвоведение. 2020. № 1. С. 31–43. <https://doi.org/10.31857/S0032180X2001013X>
24. Семенюк О.В., Телеснина В.М., Богатырев Л.Г., Бенедиктова А.И. Использование особенностей структурно-функциональной организации подстилок для оценки интенсивности круговорота в городских насаждениях (на примере Москвы) // Почвоведение. 2021. № 5. С. 592–605. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21050178>
25. Теория и практика химического анализа почв / Под ред. Л.А. Воробьевой. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
26. 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.
27. Унифицированные методы анализа вод / Под ред. Ю.Ю. Лурье. М.: Химия, 1973. 376 с.
28. Халафян А.А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных. М.: ООО “Бином-Пресс”, 2007. 512 с.
29. 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. <https://doi.org/10.1134/S0016702918100038>
30. Berg B., McClaugherty C. Plant litter. Decomposition, humus formation, carbon sequestration. Berlin: Springer-Verlag, 2008. 340 p.
31. Biester H., Hermanns Y.M., Martinez Cortizas A. The influence of organic matter decay on the distribution of major and trace elements in ombrotrophic mires – a case study from the Harz Mountains // Geochim. Cosmochim. Acta. 2012. V. 84. P. 126–136. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.01.003>
32. Bindler R. Mired in the past – looking to the future: geochemistry of peat and the analysis of past environmental changes // Glob. Planet Chang. 2006. V. 53. P. 209–221.
33. Borgulat J., Mętrak M., Staszewski T., Witkomirski B., Suska-Malawska M. Heavy metals accumulation in soil and plants of Polish peat bogs // Polish J. Environmental Studies. 2018. V. 27. № 2. P. 537–544. <https://doi.org/10.15244/pjoes/75823>
34. Coggins A.M., Jennings S.G., Ebinghaus R. Accumulation rates of the heavy metals, lead, mercury and cadmium in ombrotrophic peatlands in the west of Ireland // Atmospheric Environment. 2006. V. 40. P. 260–278.
35. Ferrat M., Weiss D.J., Spiro B., Large D. The inorganic geochemistry of a peat deposit on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau and insights into changing atmospheric circulation in central Asia during the Holocene // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2012. V. 91. P. 7–31. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.05.028>
36. Grybos M., Davranche M., Gruau G., Petitjean P. Is trace metal release in wetland soils controlled by organic matter mobility or Fe-oxyhydroxides reduction? // Int. J. Coal Geol. 2007. V. 314. P. 490–501. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2007.04.062>
37. Nieminen T.M., Ukonmaanaho L., Shotykh W. Enrichment of Cu, Ni, Zn, Pb and As in an ombrotrophic peat bog near a Cu-Ni smelter in Southwest Finland // Sci. Total Environ. 2002. V. 292. P. 81–89. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00028-1](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00028-1)
38. Olid C., Garcia-Orellana J., Martinez-Cortizas A., Masque P., Peiteado-Valera E., Sanchez-Cabeza J.A. Multiple site study of recent atmospheric metal (Pb, Zn and Cu) deposition in the NW Iberian Peninsula using peat cores // Sci. Total Environ. 2010. V. 408. P. 5540–5549. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.07.058>
39. Rausch N., Nieminen T., Ukonmaanaho L., Le Roux G., Krachler M., Cheburkin A.K., Bonani G., Shotykh W. Comparison of atmospheric deposition of copper, nickel, cobalt, zinc, and cadmium recorded by Finnish peat cores with monitoring data and emission records // Environ. Sci. Technol. 2005. V. 39. P. 5989–5998.

Formalized Analysis of the Ash Composition of Morphometric Fractions is an Objective Indicator of the Stages of Litter Transformation (Using the Example of Swamp Birch Forests)

T. T. Efremova¹*, S. P. Efremov¹, and A. F. Avrova¹

¹Sukachev Institute of Forest SB RAS, Separate subdivision at FRC KSC SB RAS,
Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036 Russia

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

Litter formed at 0–30 and 100–140 m from the bed of river in naturally drained swamp birch forests (*Betula pubescens* Ehrh.) of Western Siberia (geographical coordinates 56°23.710' north latitude, 84°34.043' east longitude) was studied. Weighted average metal content in strongly decomposed litter: Ca₁₁₅₁₅ > Fe₈₅₀₂ > Al₈₄₇₂ > Mg₁₄₆₈ > K₁₁₀₄ > Sr₄₇₁ > Na₂₀₀ > Zn_{65.3} > Cu_{15.6} > Pb_{12.1} ≈ Ni_{12.2} > Co_{9.5} > Cr_{6.2} > Cd_{0.35} mg/kg. In the roughly decomposed, the number of elements is approximately 1.5–2 times lower. The supply of mineral sub-

stances is determined by the composition of the ground plant cover of various trophic types and introduce the silt deposit by flood swamp waters. The ash composition of morphometric fractions on sieves varies greatly ($C_v - 29-47\%$) and is due to the content of sesquioxides and trace elements by 63% in strongly decomposed litter and 84% in roughly decomposed litter. The sequential accumulation of Fe, Al and trace elements in the form of insoluble organomineral complexes occurs as the plant fragments crushing in the process of concomitant humification. The gradual (mainly at the fermentation stage) removal of bases in the form of bicarbonates occurs as a result of the active formation of CO_2 . Using clustering algorithms, morphometric fractions of each type of litter were combined by ash composition into three clusters that characterize the stages of transformation of the mineral component. The formalized associations conform to the visual division of the litter into subhorizonts and characterize their size range: L – >5 , F – $5-1$, H – $1-<0.25$ mm in the strongly decomposed litter of fern-nettle-meadowsweet birch forests and, respectively, >10 , $10-5$, $1-<0.25$ mm in the roughly decomposed litter of sedge-reed grass birch forests. An objective sign of the stages of litter metamorphosis is the amount of Fe, the rankings of which at each stage of transformation are adequate to approximately double the increase relative to the initial content.

Keywords: classification of forest litter, plant debris, stages of litter transformation, multidimensional statistical analysis