

УДК 630.114.351

Природа кислотных свойств подстилки болотных березняков

Т.Т. Ефремова*, С.П. Ефремов

*Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН
Россия 660036, Красноярск, Академгородок 50, стр. 28*

Received 28.06.2012, received in revised form 14.09.2012, accepted 19.12.2012

В пределах экологического профиля на градиенте от крупнотравных до сфагново-мёртвопокровных типов болотных березняков сформированы соответствующие типы подстилок (сильноразложившаяся, среднеразложившаяся, корневищная, торфянистая, оторфованная и торфяная), которые характеризуются кислой и сильнокислой реакцией среды. Проведен корреляционно-регрессионный анализ взаимосвязи общей потенциальной кислотности подстилки, фракционно-группового состава гумусовых веществ, зольности, оксидов кальция, железа и алюминия. Выявлена значимая корреляционная связь кислотности с фульвокислотами 3-й фракции, что дает основание рассматривать эти соединения в числе кислотообразующих. Найденная отрицательная связь кислотности подстилки с зольностью, оксидами кальция и железа отражает их буферную, нейтрализующую функцию, в которой наибольшее значение имеет кальций. В обогащении подстилки минеральными элементами ведущую роль выполняет напочвенный растительный покров, биогеохимическая селекция которого происходит благодаря сукцессии типов леса под влиянием меняющихся условий увлажнения. Древесный опад формирует только базовый фон. Таким образом, влажность эдафона, определяющая в основном состав напочвенного покрова болотных березняков, опосредованно служит первопричиной формирования кислотных свойств подстилки.

Ключевые слова: кислотность, подстилка, болотные березняки, регрессионный анализ.

Введение

Подстилка – одно из главных биогеоценотических образований лесных экосистем. Качество подстилки реально влияет на формирование генетического разнообразия лесных почв, обуславливает интенсивность торфогенеза в лесных гидроморфных ком-

плексах, определяет их лесорастительный потенциал и активно регулирует ход естественного возобновления древесных насаждений. Подстилки болотных лесов относительно дендроценозов автоморфных условий произрастания изучены недостаточно. Мало информации о морфолого-генетическом строе-

нии, минеральном и компонентном составе подстилок, особенностях биохимической деструкции растительного субстрата и влиянии этих факторов на кислотные свойства подстилок, определяющих специфику современного почвообразования на лесных болотах и торфогенез. В той или иной степени эти вопросы нашли отражение в ряде публикаций (Ефремова, 1973; Козловская, 1983; Пьявченко, 1983; Luo, Christie, 2001; Kakei, Clifford, 2002; Batty, Younger, 2007 и др.). По степени изученности исключением в определённой мере стали болотные березняки Западной Сибири, доля которых в формационной структуре лесных гидроморфных комплексов данного региона составляет 27,4 % (Ефремов и др., 2005; Ефремова и др., 2009, 2010а, 2010б; Sekretenko et al., 2011).

Важным информативным показателем качества подстилки служат её кислотно-основные свойства, которые в значительной мере обуславливают микробиологическую и ферментативную деструкцию растительного субстрата, ёмкость катионного обмена и состав обменных катионов, подвижность химических элементов, их доступность растениям, окислительно-восстановительное состояние и другие свойства среды, определяя в конечном итоге плодородие лесных местообитаний. Общеизвестно, что, характеризуя кислотность субстрата, необходимо оценивать актуальную и разновидности потенциальной – гидролитическую и обменную. Актуальная кислотность (рН) даёт представление об активности ионов H^+ в жидких фазах исследуемых систем, гидролитическая и обменная связаны с твёрдыми фазами и отражают количество титруемых веществ, обладающих кислотными свойствами. Гидролитическая кислотность наряду с компонентами обменной включает и более слабые кислотные ингредиенты, которые способны к диссоциа-

ции и нейтрализации при взаимодействии со щелочными растворами. Поэтому гидролитическую кислотность, определяемую с помощью щелочных буферных растворов (рН 8,3), предлагается рассматривать как показатель общей потенциальной кислотности, характеризующей суммарное содержание всех кислотных компонентов (Воробьева, Авдонькин, 2006).

Цель данной статьи – охарактеризовать кислотность подстилки болотных березняков в пределах типологического ряда, сопряженных по влажности эдафона, выявить ведущие факторы формирования кислотных свойств, рассмотрев влияние минеральной компоненты и фракционно-группового состава органического вещества как продуктов биогеохимической трансформации растительного опада, слагающего подстилку. Такой подход позволит в некоторой степени осветить практически не изученный вопрос об изменении свойств подстилки в ходе сукцессии болотных березняков с учётом их парцеллярного строения.

Район работ, материалы и методы

Объектом исследования послужила мезо-евтрофная часть Еловочного болота, расположенного в южнотаежной подзоне Западной Сибири. На междуречье Оби и Томи это один из самых крупных болотных массивов общей площадью 2,3 тыс. га. К настоящему времени здесь сформировалась локально обособленная внутриболотная гидрографическая сеть, стержневым элементом которой является русло р. Еловки (56°23'710"с.ш., 84°34'043"в.д.) и древний заторфованный тальвег в 100–140 м от русла, по вогнутой поверхности которого весной аккумулируются потоки талых вод. Вследствие естественного дренирующего влияния внутриболотной речки определён-

ная часть болота к настоящему времени покрыта сосновыми и берёзовыми древостоями. Объектом исследования стали насаждения берёзы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.), примыкающие к руслу. По мере удаления от береговой линии изменяется уровень почвенно-грунтовых вод, снижается их проточность, увеличивается влажность почв (рис. 1), что обуславливает соответствующую смену доминирующих растительных группировок. Чтобы охватить весь типологический спектр болотных березняков, проложили экологический профиль от русла внутриболотной речки вглубь торфяного массива (270×60 м). В его пределах выделены следующие типы леса: 0–30 м от русла – папоротниково-крапивно-лабазниковый березняк, на расстоянии 30–100 м – вейниково-лабазниковый, 100–140 м – вейниково-осоковый заочкаренный, 140–230 м – травяно-осоково-сфагновый, 230–270 м – осоково-сфагнуво-мёртвопокровный.

Диагностика подстилок основывалась на представлении о присущей им структурной организации и большом значении типодиагностических горизонтов (Карпачевский, 1977; Сапожников, 1984; Богатырев и др., 2004). В

исследуемых болотных березняках мезо-евтрофного экогенетического ряда выделено шесть типов лесной подстилки: сильноразложившаяся, среднеразложившаяся, грубо-разложившаяся (корневищная), торфянистая, оторфованная и торфяная. Подстилки имеют мощность от 3,6 до 6,2 см и отличаются низкой плотностью 0,047–0,079 г/см³. Типы подстилок приурочены, как правило, к определённым звеньям типологического профиля, связанным с условиями увлажнения. Сильно-разложившаяся полнопрофильная подстилка (с подгоризонтами – L, F, H) сформирована на участках, непосредственно примыкающих к руслу внутриболотной речки (0–30 м). Вглубь торфяного массива строение подстилок упрощается. Среднеразложившаяся подстилка включает гумифицированный подгоризонт (H) лишь фрагментарно. Корневищная, торфянистая, оторфованная сложена преимущественно листовым и ферментативным подгоризонтами, торфяная – очесом сфагновых мхов. Подстилки различаются и по составу растительных компонентов. В сильно- и среднеразложившихся подстилках крупнотравной группы типов леса (0–100 см от русла)



Рис. 1. Уровень верховодки и влажность подстилки болотных березняков в пределах экологического профиля (средние значения за теплый период 2005–2007 гг.)

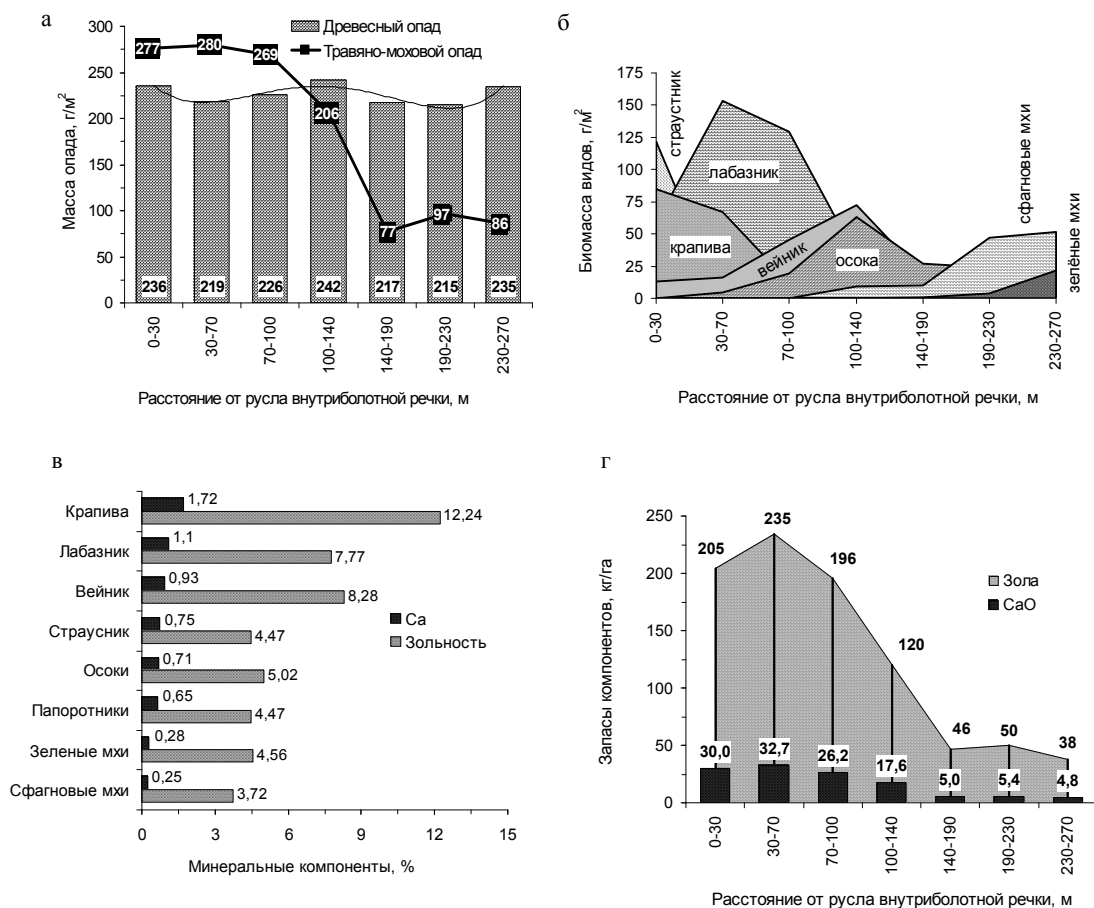


Рис. 2. Масса древесного опада и живого травяно-мохового покрова в различных звеньях экологического профиля болотных березняков (а), биомасса доминантных видов растений в составе напочвенного покрова (б), содержание кальция и зольность в доминантных видах растений (в), средневзвешенное поступление золы и оксида кальция в подстилку с напочвенным растительным покровом (г)

доминирует травяной опад, преимущественно стебли крапивы, лабазника, папоротника (рис. 2а, б). В корневищной – груборазложившейся подстилке (100–140 м) остатки берёзы и напочвенного растительного покрова (вейника, осок) приблизительно уравновешены. Торфянистая и оторфованная подстилки сложены преимущественно древесными остатками. Более подробная морфолого-генетическая характеристика типов подстилок приведена в работе (Ефремова и др., 2010а).

Исследования свойств подстилки в пределах экологического ряда выполнялись на протяжении 2004–2007 гг. Для отбора об-

разцов выбиралось 10 точек опробования по 5 справа и слева от срединной линии в пределах каждого типа леса. Древесный опад учитывался по 70 опадоуловителям (100×100 см), установленных через 10 м друг от друга по линии отбора образцов подстилки. Биомасса напочвенного растительного покрова определялась однократно с площадок 50×50 см по 20 вариантам в каждом типе березняков.

Физико-химические свойства подстилки определялись общепринятыми в почвоведении методами (Агрохимические методы исследования почв, 1975). Объемная масса подстилки (для расчета её запасов) опреде-

лялась в полевых условиях методом кольца, зольность – путем прокаливания подстилки в муфеле при 450 °С в течение 6 ч. Значения рН водной вытяжки измеряли потенциометрически. Гидролитическая (общая потенциальная) определялась по методу Каппена, обменная кислотность – по методу Дайкухара. Полученные значения гидролитической кислотности умножали на 1,75 – условно принятый коэффициент на неполноту вытеснения H^+ . Сумма обменных оснований ($Ca^{2+} + Mg^{2+}$) определялась по методу Каппена–Гильковица, общее (валовое) содержание СаО – трилометрическим методом с индикатором мурексидом после мокрого озоления пробы смесью серной и хлорной кислот. Результаты измерений выражались в %, т.е. на 100 г подстилки или растений, высушенных до постоянного веса при 105 °С. Групповой и фракционный состав органического вещества выполнен по методике В.В. Пономарёвой, Т.А. Николаевой (1980). Органические формы углерода и азота определяли по методу Анстета и по Кьельдалю соответственно. В классе гумусовых веществ выделены две основные группы: гуминовые кислоты (ГК) и фульвокислоты (ФК), которые различаются растворимостью, осаждаемостью, элементарным составом, деталями строения молекулы и др. свойствами. Каждая из групп содержит несколько различных фракций, отражающих прочность связи гумусовых веществ с поверхностью материнской породы, и/или степень дисперсности гумусовых веществ в случае высокой концентрации разлагающегося органического материала (торфяной субстрат, подстилка). В ходе анализа первая фракция гумусовых кислот (ГК-1 + ФК-1) извлекалась непосредственно раствором 0,1 N NaOH на холоду, вторая фракция (ГК-2+ФК-2) – раствором 0,1 N NaOH после декальцирования, третья фракция (ГК-3 + ФК-3) – 0,02 N NaOH

при нагревании на водяной бане в течение 6 часов. В отдельных порциях каждой из щелочных вытяжек осаждали гуминовые кислоты добавлением эквивалентного количества 1N H_2SO_4 . Фульвокислоты (ФК-1, ФК-2 и ФК-3) вычисляли по разности между углеродом соответствующих щелочных вытяжек и гуминовых кислот. Агрессивная фракция фульвокислот (ФК-1a) определялась непосредственно в 0,1 N растворе H_2SO_4 . Углерод щелочных вытяжек, гуминовых кислот и фульвокислот ФК-1a определяли дихроматным методом по Тюрину. Содержание групп и фракций органического вещества выражали в процентах от массы общего органического углерода в подстилке.

Экспериментальный материал обработан методами корреляционного и многофакторного регрессионного анализа в пакете программ STATISTICA 6.0.

Результаты и обсуждение

Морфолого-генетические типы подстилок болотных березняков относительно русла внутриболотной речки формировали следующие запасы органического вещества: 4,5 кг/м² (0–30 м) > 3,7 (30–100 м) > 2,1 (100–140 м) < 2,5 (140–230 м) < 3,1 кг/м² (230–270 м). Подстилки относились преимущественно к нормально-зольным (табл. 1). Содержание минеральных элементов варьировало: Fe_2O_3 – 0,53–1,64 %, Al_2O_3 – 0,70–1,57, СаО – 0,30–1,44 %, обменных оснований (Са+Mg) 33,54–86,6 мг-экв./100 г навески. Вариабельность свойств прослеживается достаточно четко. Середняя часть экогенетического профиля (100–140 м) служит определенным рубежом, относительно которого изменения в условиях местообитания болотных березняков имеют различную направленность. В направлении русла внутриболотной речки лесорастительные свойства подстилок улучшаются: возрастает

Таблица 1. Средние значения химических свойств и фракционно-групповой состав органического вещества подстилок болотных березняков

Показатели	Морфогенетические типы подстилок и расстояние от русла внутриболотной речки, м					
	Сильно-разложившаяся, 0-30	Средне-разложившаяся, 30-100	Корневичная, 100-140	Торфянистая, 140-190	Оторфованная, 190-230	Торфяная, 230-270
Химические свойства, % от массы подстилки						
Зольность	15,73	14,86	10,26	8,03	7,27	8,52
CaO	1,44	1,15	0,67	0,46	0,32	0,30
Fe ₂ O ₃	1,64	1,24	0,93	0,92	0,66	0,53
Al ₂ O ₃	1,57	1,34	0,77	0,70	0,89	1,10
Ca+Mg, мг-экв./100 г	86,62	71,26	54,09	44,68	44,3	33,54
Число наблюдений	30	30	30	15	15	30
Групповой и фракционный состав органического вещества, % от общего углерода подстилки						
Отношение C/N	18,3	22,37	27	30,22	32,05	40,24
Гуминовые кислоты:						
ГК-1	15,77	11,89	10,26	11,85	8,75	6,33
ГК-2	нет	нет	нет	нет	нет	нет
ГК-3	9,07	8,36	8,03	8,04	7,7	7,42
Сумма ГК	24,84	20,25	18,28	19,89	16,45	13,75
Фульвокислоты						
ФК-1а	3,011	2,93	3,51	2,75	3,27	2,97
ФК-1	13,43	13,41	12,45	10	12,59	11,78
ФК-2	3,0	2,65	3,22	3,44	3,64	2,97
ФК-3	5,12	5,23	5,51	6,03	5,78	6,02
Сумма ФК	24,66	24,22	24,69	22,24	25,28	23,74
ГК-1+ФК-1	29,2	25,3	22,71	21,85	21,34	18,11
∑ГК+∑ФК	49,5	44,47	42,96	42,13	41,73	37,49
Сгк/Сфк	1	0,84	0,74	0,89	0,65	0,58
Число наблюдений	5	5	5	5	5	5

плотность слоения, зольность, содержание оксидов трехвалентных металлов, обменных оснований. Вглубь торфяного массива эти показатели снижаются и качество среды ухудшается.

Сходным трендом характеризуются и процессы преобразования органического вещества подстилок. О глубине фоссилизации растительных остатков свидетельствует степень их гумификации (∑ГК+∑ФК) –

37,5–49,5 % и отношение общего углерода к общему азоту (C/N), которое в подстилках закономерно уменьшалось по мере приближения к руслу реки с 40,24 до 18,3. В составе гуминовых кислот доминировала фракция ГК-1, содержание которой было наибольшим в сильноразложившейся подстилке (15,77 %), наименьшим – в торфяной (6,33 %). Изменения в содержании ФК-1 (10,0–13,43 %) менее выражены, хотя и повторяли выявленную

относительно ГК-1 тенденцию. Гуминовые кислоты ГК-3 концентрировались преимущественно в сильноразложившейся подстилке, изменяясь в пределах экологического профиля от 7,42 до 9,07 %, фульвокислоты ФК-3 в количестве 5,12–6,03 % накапливались в моховой подстилке. Гуминовые кислоты фракции ГК-2, связанные с кальцием, отсутствовали, что характерно для лесных местообитаний. Фульвокислоты – ФК-2 и агрессивная фракция ФК-1а содержатся во всех типах подстилок практически в одинаковом количестве (около 3 %) и, следовательно, не несут никакой информационной нагрузки. Гумус сильноразложившейся, среднеразложившейся и оторфованной подстилок характеризуется гуматным типом: отношение углерода гуминовых кислот к углероду фульвокислот

(Сгк / Сфк) – 0,74–1, гумус торфянистой и торфяной подстилок – фульватно-гуматным типом: Сгк / Сфк 0,58–0,65 (оценка по: Зонн, Урушадзе, 1974).

Подстилка болотных березняков характеризовалась кислой и сильнокислой реакцией, варьирующей по звеньям экологического профиля от 3,7 до 5,5 рН, высокой потенциальной кислотностью: общей (гидролитической) 75,9–174,4 и обменной 3,7–25,8 ммоль(+)/100 г (табл. 2). По мере удаления от русла внутриболотной речки показатели последовательно нарастают и характеризуются в основном слабой ($C_v \leq 10\%$) и средней вариабельностью.

Все виды кислотности, согласно статистическим оценкам (R^2 , p -уровень значимости), тесно с большой долей вероятности

Таблица 2. Характеристика различных видов кислотности подстилок болотных березняков по экологическому профилю

Статистические оценки	Расстояние от русла внутриболотной речки, м							По экологическому профилю в целом
	0–30	30–70	70–100	100–140	140–190	190–230	230–270	
Общая потенциальная (гидролитическая) кислотность, ммоль(+)/100 г								
Среднее	91,1	91,4	95,4	118,4	138,3	149,9	151,9	119,8
Минимум	75,9	77,9	76,8	106,2	116,5	122,6	139,3	75,9
Максимум	104,0	99,2	108,2	132,0	150,5	165,3	174,3	174,4
C_v	7,1	6,3	7,5	6,2	8,3	9,5	5,4	22,3
n	30	15	15	30	15	15	30	150
Обменная кислотность, ммоль(+)/100 г								
Среднее	5,7	5,3	6,0	10,2	13,9	15,8	16,2	10,5
Минимум	4,0	3,7	4,1	7,2	9,8	11,7	11,5	3,7
Максимум	8,5	7,3	8,5	13,5	19,1	25,8	22,0	25,8
C_v	22,2	22,3	23,1	17,5	23,1	24,4	19,2	48,1
Актуальная кислотность (рН водный)								
Среднее	5,0	5,0	5,0	4,6	4,3	4,1	4,0	4,6
Минимум	4,7	4,8	4,8	4,4	4,0	3,8	3,7	3,7
Максимум	5,5	5,2	5,3	4,9	4,5	4,3	4,2	5,5
C_v	3,5	2,2	3,1	3,3	4,5	4,1	3,6	10,1

C_v – коэффициент вариации, n – число измерений для всех видов кислотности.

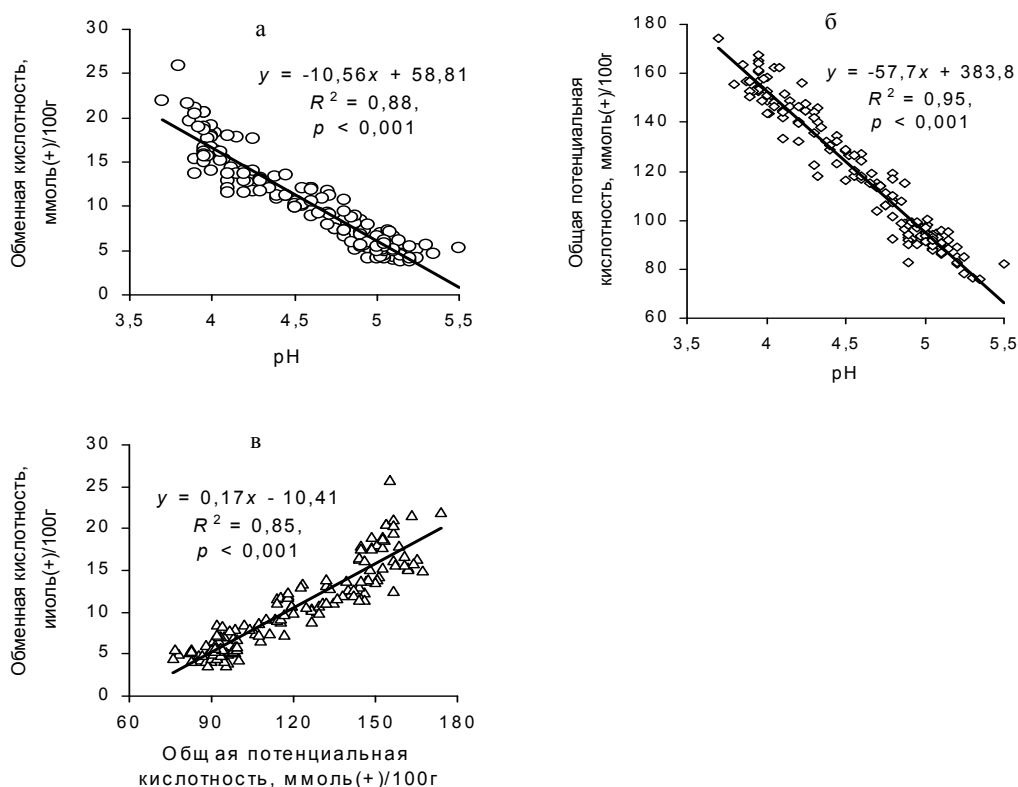


Рис. 3. Парный регрессионный анализ связи: обменной кислотности и величины рН (а), общей потенциальной кислотности и величины рН (б), обменной и общей потенциальной кислотности (в)

взаимосвязаны (рис. 3). Сопряженность видов кислотности установлена и в горизонтах минеральных почв, но она, как правило, характеризуется слабой корреляцией (Орлов, 1985; Воробьева, Авдонькин, 2006). Сильные, статистически значимые корреляционные связи видов кислотности в подстилке болотных березняков дают основание не рассматривать их в качестве самостоятельных категорий или говорить об их различной природе, что вполне созвучно мнению Д.С. Орлова (1985). Поэтому далее будет обсуждаться только общая потенциальная кислотность, которая наряду с суммарным содержанием обменных оснований (Са+Mg) предложена в качестве диагностического критерия генетических ассоциаций подстилок болотных березняков (Ефремова и др., 2010а).

Потенциальная кислотность почвенной среды образуется из разных источников. Одну из наиболее важных ролей в происхождении титруемой кислотности играют растворимые органические кислоты – продукты жизнедеятельности микроорганизмов, грибов, низших и высших растений, а также специфические гумусовые кислоты, образующиеся в результате сложных биохимических трансформаций органических остатков. Значение гумифицированных продуктов в развитии кислотных свойств подстилки болотных березняков Западной Сибири обсуждается впервые.

Согласно корреляционной матрице (табл. 3) сильные статистически значимые коэффициенты наблюдались между общей потенциальной кислотностью и показателями, характеризующими глубину биохимической

Таблица 3. Коэффициенты корреляции Пирсона химических и биохимических показателей подстилки болотных березняков (доверительный коэффициент $r > 0,81$ с вероятностью 95 %)

Показатели	H*	Зольность	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	C/N	СГ**	ГК-1	ГК-3	ГК-1+ГК-3	ФК-1	ФК-3	ГК-1+ФК-1
H*	---	-0,96	-0,94	-0,70	-0,92	0,93	-0,86	-0,83	-0,90	-0,84	-0,64	0,94	-0,91
Зольность	-0,96	---	0,91	0,86	0,92	-0,84	0,80	0,75	0,86	0,77	0,71	-0,92	0,87
Fe ₂ O ₃	-0,94	0,91	---	0,71	0,98	-0,95	0,96	0,96	0,99	0,96	0,51	-0,86	0,98
Al ₂ O ₃	-0,70	0,86	0,71	---	0,78	-0,56	0,61	0,51	0,67	0,54	0,74	-0,74	0,68
CaO	-0,92	0,92	0,98	0,78	---	-0,91	0,94	0,91	0,98	0,92	0,58	-0,88	0,96
C/N	0,93	-0,84	-0,95	-0,56	-0,91	---	-0,96	-0,93	-0,95	-0,93	-0,56	0,90	-0,97
СГ**	-0,86	0,80	0,96	0,61	0,94	-0,96	---	0,96	0,98	0,96	0,54	-0,86	0,99
ГК-1	-0,83	0,75	0,96	0,51	0,91	-0,93	0,96	---	0,97	1,00	0,30	-0,72	0,95
ГК-3	-0,90	0,86	0,99	0,67	0,98	-0,95	0,98	0,97	---	0,98	0,48	-0,84	0,99
ГК-1+ГК-3	-0,84	0,77	0,96	0,54	0,92	-0,93	0,96	1,00	0,98	---	0,32	-0,74	0,96
ФК-1	-0,64	0,71	0,51	0,74	0,58	-0,56	0,54	0,30	0,48	0,32	---	-0,85	0,59
ФК-3	0,94	-0,92	-0,86	-0,74	-0,88	0,90	-0,86	-0,72	-0,84	-0,74	-0,85	---	-0,90
ГК-1+ФК-1	-0,91	0,87	0,98	0,68	0,96	-0,97	0,99	0,95	0,99	0,96	0,59	-0,90	---

H* – общая потенциальная кислотность, СГ** – степень гумификации (Σ ГК+ Σ ФК).

трансформации подстилки: отрицательные со степенью гумификации (Σ ГК + Σ ФК) и положительные с отношением С / N. При этом весомый вклад вносят гуминовые кислоты обеих фракций. Фульвокислоты влияют на кислотные свойства подстилки неоднозначно: с фракцией ФК-3 установлена сильная положительная связь, с ФК-1 – отрицательная. Чтобы определить самые значимые показатели группового и фракционного состава органического вещества в прогнозе кислотности подстилки, применили процедуру множественного регрессионного анализа. Отобрали наиболее коррелирующие с потенциальной кислотностью переменные: ФК-3, ГК-3, группу гуминовых кислот (ГК-1+ГК-3), гумусовые кислоты 1-й фракции (ГК-1+ФК-1) и сумму гумусовых кислот (Σ ГК+ Σ ФК). Все взятые в анализ показатели сильно коррелируют и между собой. Поэтому в модуле множественной регрессии использовали пошаговую процедуру. По сравнению со стандартной процедурой ре-

грессии коррелированность прогностических признаков не так критична, так как из пары признаков, имеющих сильную корреляцию, алгоритм включает только один, который в большей мере влияет на зависимую переменную (Реброва, 2003)

Из большинства комбинаций объясняющих признаков алгоритм чаще всего включал в модель гумусовые кислоты 1-й фракции и ФК-3 в качестве наиболее значимых прогностических показателей общей потенциальной кислотности подстилки (R^2 – 0,84–0,89) (табл. 4). Все остальные компоненты гумусовой системы исключались, как правило, из модели как неинформативные. Положительная взаимосвязь общей потенциальной кислотности с содержанием фульвокислот 3-й фракции обусловлена, вероятно, тем, что они образуются на начальном этапе гумификации (Ефремова, 1992). Первый элементарный процесс гумификации, в понимании Л.Н. Александровой (1980), представляет собой

Таблица 4. Статистическая оценка уравнений множественной линейной регрессии связи общей потенциальной кислотности, содержания оксидов кальция и железа и фракционно-группового состава органического вещества в подстилке болотных березняков

Предикторы	Стандартизованный коэффициент и его оценка		Качество подгонки модели		
	β	p	R^2	F -критерий	p
Минеральные вещества					
CaO	-0,956	0,003	0,91	42,90	< 0,003
Fe ₂ O ₃	исключен из модели				
Гумусовые вещества					
ФК-3	0,941	0,005	0,89	31,19	< 0,005
ГК-3	исключен из модели				
ФК-3	0,941	0,005	0,89	31,19	< 0,005
ГК-1 + ФК-1	исключен из модели				
ГК-3	исключен из модели		0,84	20,55	< 0,010
ГК-1 + ФК-1	-0,915	0,010			
ФК-3	0,941	0,005	0,89	31,19	< 0,005
ΣГК + ΣФК	исключен из модели				
ГК-1 + ФК-1	-0,915	0,010	0,84	20,55	< 0,010
ΣГК + ΣФК	исключен из модели				
Гумусовые + минеральные вещества					
CaO	-0,956	0,003	0,91	42,90	< 0,003
ФК-3	исключен из модели				
CaO	-0,956	0,003	0,91	42,90	< 0,003
ГК-1 + ФК-1	исключен из модели				
CaO	-0,923	0,009	0,85	23,1	< 0,009
ГК-1 + ГК-3	исключен из модели				

окислительное кислотообразование, в процессе которого активно формируются кислые функциональные группы. Образующая система гумусовых кислот подвергается в дальнейшем длительным и сложным процессам трансформации. Отрицательная сильная корреляция кислотности подстилки с суммой (ГК-1+ФК-1) обусловлена, по-видимому, более зрелой природой гумусовых кислот 1-й фракции. Вероятнее всего, они представляют собой комплексно-гетерополярные соли – продукты следующих после активного кислотообразования процессов взаимодействия гумусовых кислот с минеральной частью подстилки. Согласно Л.Н. Александровой (1980),

некоторые металлы, в частности железо и алюминий, при взаимодействии с гумусовыми кислотами образуют комплексные соли, в которых металл входит в состав анионной части молекулы и не способен к обменным реакциям. При этом сохраняется свободной некоторая часть карбоксильных групп, которые могут замещаться катионами щелочных и щелочно-земельных оснований. Эти соединения выпадают в твёрдую фазу на месте своего образования и, не обладая способностью к миграции, оказывают существенное влияние на нейтрализацию кислой среды. Полученные результаты вполне созвучны этим представлениям. Так, сильно- и среднераз-

ложившаяся подстилки, в составе гумусовых кислот которых доминирует 1-я фракция, характеризуются и самой низкой кислотностью по сравнению с другими типами.

Соответствуют высказанным соображениям и результаты анализа связи кислотности подстилки с минеральными компонентами. Установлено, что общая потенциальная кислотность тесно отрицательно связана с зольностью подстилки, оксидами кальция, железа в её составе и несколько слабее с оксидом алюминия (табл. 3). Чтобы выяснить, какой из зольных элементов, Fe_2O_3 или CaO , сильно коррелирующих между собой, оказывает наибольшее влияние на величину общей потенциальной кислотности, применили алгоритм пошаговой процедуры множественного регрессионного анализа. В результате комбинации Fe_2O_3 и CaO в качестве предикторов в уравнение множественной регрессии был включён только оксид кальция, связанный с показателями общей потенциальной кислотности на 91 % (табл. 4). Оксид железа исключен из модели как неинформативный. Вероятно, железо, образуя комплексную соль с гумусовыми кислотами, входит в состав анионной части молекулы и слабо влияет на кислотные свойства подстилки, так как не способно к обменным реакциям.

Из числа объясняющих органических и минеральных показателей, наиболее тесно связанных с кислотностью, сочли целесообразным определить ведущий фактор кислотности подстилки. Зависимость между откликом (кислотностью) и предикторами сильная (R^2 0,85–0,91) и статистически значимая. Однако CaO по сравнению с другими, не включенными в модель признаками, в наибольшей степени (при уже включенных на более ранних шагах процедуры) влияет на зависимый признак. Из этого следует, что в регулировании кислотных свойств подстил-

ки болотных березняков важная роль принадлежит кальцию как одному из основных элементов её минерального состава.

Минеральные (зольные) вещества регулярно поступают в подстилку болотных березняков с почвенно-грунтовыми водами, атмосферными осадками, частично с наносами паводковых вод, но главным образом с фитодетритом. Влияние запасов зольных веществ в напочвенном растительном покрове и древесном опаде на величину общей потенциальной кислотности оценивалось с помощью стандартного модуля множественного регрессионного анализа. Значение индекса детерминации в модели (R^2 0,93), характеризующее высокое качество предсказания, объясняет почти всю изменчивость общей потенциальной кислотности подстилки болотных березняков (табл. 5). Величина стандартизованного коэффициента, позволяющая сравнивать вклады каждого предиктора, свидетельствует о том, что влияние запасов золы напочвенного покрова на кислотность подстилки достоверно. Вклад минеральных веществ древесного опада – статистически не значим. Специфическое влияние нижних ярусов растительности на изменение свойств, величины pH и питательного режима минеральных почв показано также в работах (Карпачевский и др., 1980; Бганцова, 1991; Лукина и др., 2006, 2008; и др.).

Воздействие напочвенного растительного покрова связано не только с величиной массы органического вещества, поступающего в подстилку из различных ярусов растительности, но и с особенностями его химического состава. Средневзвешенное количество древесного опада в пределах экологического профиля изменяется слабо и составляет 221,2 г/м² (рис. 2а). Биомасса напочвенного растительного покрова, напротив, варьирует в широких пределах, 77–280

Таблица 5. Статистическая оценка уравнения множественной регрессии связи потенциальной кислотности подстилки, запасов золы в древесном опаде и травяно-моховом напочвенном покрове

Предикторы	Коэффициенты уравнения и их оценка			
	стандартизованные	регрессионные	<i>t</i> -критерий	<i>p</i>
Качество подгонки модели: $R^2 = 0,93$ F -критерий = 28,4 $p < 0,004$				
Константа		167,78	4,338	0,012
Напочвенный покров	-0,843	-2,216	-3,772	0,019
Древесный опад	-0,147	-2,715	-0,656	0,547

г/м², что обусловлено сложной синузильно-парцеллярной структурой сукцессионного ряда болотных березняков. При этом доминантные виды растений напочвенного покрова в большей или меньшей мере различаются содержанием золы и кальция (рис. 2в). В частности, сильно контрастируют с зелёными и сфагновыми мхами крапива, лабазник, вейник. Мезофитное высокотравье, господствуя главным образом на участке 0–100 м относительно русла, поставляет от 196 до 235 кг/га зольных веществ и 26,2–30 кг/га кальция, что в 5–6 раз больше, чем болотно-разнотравные и моховые сообщества, удалённые от дренирующего влияния внутриболотной речки (рис. 2г).

Можно констатировать, что в процессе сукцессии болотных березняков происходит биогеохимическая селекция напочвенного покрова по аккумуляции минеральных соединений, в том числе, щёлочно-земельных оснований, способных к активной нейтрализации свободных ионов водорода. В типологическом ряду болотных березняков чем меньше содержание СаО в подстилке, тем выше показания общей потенциальной кислотности. Зависимость аппроксимируется следующим регрессионным уравнением: $y = 164,34 - 55,49 x$, где y – общая потенциальная кислотность, ммоль(+) / 100 г, x – СаО %. Показатели степени подгонки моде-

ли: $R^2 = 0,95$, F -критерий = 76,48, p -уровень < 0,001. Из уравнения следует: при возрастании величины оксида кальция на единицу (в пределах 0,3–1,44 %) общая потенциальная кислотность подстилки снижается в среднем на 55,49 ммоль(+) / 100 г.

Полученные материалы свидетельствуют о том, что кислотность подстилки типологического ряда болотных березняков по большей части определяется парцеллярной структурой напочвенного растительного покрова, обусловленной влажностью эдафона. Специфичное воздействие травяно-мохового яруса с его флористическим и биогеохимическим разнообразием проявляется как посредством массы растительных остатков, так и через количество минеральных элементов (в том числе кальция), поступающих в подстилку. Древесные остатки, достаточно сходные в типологическом ряду по количеству и качеству, создают в подстилке достаточно однородную кислотную среду, на фоне которой проявляется индивидуальное воздействие видового разнообразия растений нижних ярусов.

Заключение

В экологическом ряду болотных березняков от крупнотравных до сфагново-мёртвопокровных типов леса сформированы различные типы подстилок (сильноразло-

жившаяся, среднеразложившаяся, корневищная, торфянистая, оторфованная и торфяная), которые характеризуются кислой и сильнокислой реакцией среды. Определяющим фактором всех различий между звеньями этого ряда является увлажнение. Среди кислотообразующих веществ выявлена ведущая роль фульвокислот 3-й фракции – продуктов начального звена гумификации детрита. В числе факторов, регулирующих (нейтрализующих) кислотность среды, установлена преимущественная роль кальция. Показано,

что наибольший вклад в обогащение подстилки зольными веществами, в том числе кальцием, выполняет напочвенный растительный покров, биогеохимическая селекция которого происходит благодаря сукцессии типов леса. В конечном итоге именно влажность почвенной среды, влияя на видовой состав нижних ярусов растительности, опосредованно служит первопричиной формирования кислотных свойства подстилки. Древесный опад болотных березняков формирует только базовый фон.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы Президиума РАН № 30 (проект СО РАН № 30.11).

Список литературы

1. Агрохимические методы исследования почв (1975). М.: Наука, 656 с.
2. Александрова Л.Н. (1980) Органическое вещество почвы и процессы его формирования. Л.: Наука, 288 с.
3. Бганцова В.А. (1991) Влияние травянистых растений на свойства почвы в лесном БГЦ. Почвоведение 10: 131-143.
4. Зонн С.В., Урушадзе Т.Ф. (1974) Научные основы и методические указания к биогеоэкологическому изучению почв горных лесов. Тбилиси: Мицниереба, 113 с.
5. Богатырев Л.Г., Демин И.И., Матышак Г.В., Сапожникова В.А. (2004) О некоторых теоретических аспектах исследования лесных подстилок. Лесоведение 4: 17–30.
6. Воробьева Л.А., Авдонькин А.А. (2006) Потенциальная кислотность. Понятия и показатели. Почвоведение 4: 421–431.
7. Ефремов С.П., Ефремова Т.Т., Блойтен В. (2005) Биологическая продуктивность и углеродный пул фитомассы лесных болот Западной Сибири. Сибирский экологический журнал 1: 29-44.
8. Ефремова Т.Т. (1973) Формирование лесных подстилок при естественном облесении осушенных болот. В: Комплексная оценка болот и заболоченных лесов в связи с их мелиорацией. Новосибирск: Наука, с.142–162.
9. Ефремова Т.Т. (1992) Почвообразование и диагностика торфяных почв болотных экосистем. Почвоведение 12: 25–35.
10. Ефремова Т.Т., Аврова А.Ф., Ефремов С.П., Мелентьева Н.В. (2009) Стадийность трансформации органического вещества подстилок болотных березняков. Почвоведение 10: 1203-1212.
11. Ефремова Т.Т., Ефремов С.П., Аврова А.Ф. (2010а) О сопряженности морфогенетических типов подстилок с их свойствами в болотных березняках. Почвоведение 8: 920-928.
12. Ефремова Т.Т., Ефремов С.П., Аврова А.Ф., Мелентьева Н.В. (2010б) Минеральная компонента подстилок болотных березняков: условия накопления и связь с продуктивностью древостоев. Журнал Сибирского федерального университета, Биология 3(2): 211–223.

13. Карпачевский Л.О. (1977) Пестрота почвенного покрова в лесном биогеоценозе. М.: Изд-во МГУ, 312 с.
14. Карпачевский Л.О., Холопова Л.Б., Просвирина А.П. (1980) О динамике строения почвенного покрова в лесных биогеоценозах. Почвоведение 5: 40–49.
15. Козловская Л.С. (1983) Процессы разложения в подстилке таёжных болотных лесов. В: Роль подстилки в лесных биогеоценозах. М.: Наука, С. 89–90.
16. Лукина Н.В., Никонов В.В., Исаева Л.Г. (2006) Кислотность и питательный режим почв еловых лесов. В: Коренные еловые леса: биоразнообразие, структура и функции. СПб: Наука, с. 215-254.
17. Лукина Н.В., Полянская Л.М., Орлова М.А. (2008) Питательный режим почв северотаёжных лесов. М.: Наука, 342 с.
18. Орлов Д.С. (1985) Химия почв. М.: Изд-во МГУ, 576 с.
19. Пономарева В.В., Николаева Т.А. (1980) Гумус и почвообразование. Л.: Наука, 222 с.
20. Пьявченко Н.И. (1983) Лесная подстилка как фактор торфообразования. В: Роль подстилки в лесных биогеоценозах. М.: Наука, с. 168.
21. Реброва О.Ю. (2003) Статистический анализ медицинских данных. Применение пакета прикладных программ STATISTICA. М.: МедиаСфера, 312 с.
22. Сапожников А.П. (1984) Лесная подстилка – номенклатура, классификация и индексация. Почвоведение 5: 96–105.
23. Batty L.C., Younger P.L. (2007) The effect of pH on plant litter decomposition and metal cycling in wetland mesocosms supplied with mine drainage. Chemosphere 66(1): 158–164.
24. Kakei M., Clifford P.E. (2002) Long-term effects of liming on needles, soil properties, and soil water in a Sitka spruce stand on deep peat. Forestry 75(5): 553–567.
25. Luo Y.M., Christie P. (2001) Short-term effects of alkaline biosolids on pH and trace metals growth of *Picea sitchensis*. Forestry 74(2): 145-159.
26. Sekretenko O.P., Efremova T.T., Avrova A.F., Efremov S.P. (2011) Factors influencing the spatial pattern of the ash content of bog birch forest litter. Procedia Environmental Sciences 3: 99–104.

Nature of Acidic Properties of Litter in Bog Birch Forests

Tamara T. Efremova and Stanislav P. Efremov
*V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS,
50/28 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036 Russia*

Different litter types (strongly decomposed, average decomposed, rhizomatous, peaty, peatified and peaty) characterized by acid and heavily acid reaction of environment, have been formed in the ecological series of bog birch forests beginning from the tall herb to the sphagnum- dead cover forest types. The key factor of differences among sections of this series is moistening. Relationships between total potential acidity of litter and humic fractional and group composition and ash substances,

including calcium and iron oxides, were studied using correlation and regression analyses. Fulvoacids of the third fraction, i.e. products of the initial section of detritus humification, were significantly correlated with the total acidity, hence, these compounds may be considered as acidic-forming. Among factors which regulate (neutralize) the acidity of environment, the preferential role of calcium has been revealed. It was shown that the most contribution of ash substances, including calcium, to litter enrichment is made by ground vegetation which biochemical selection takes place due to forest type succession. Finally, it is the soil moisture, having an impact on species composition of lower vegetation layers, that is indirectly a prime cause of formation of acidic litter properties. Plant debris of birch forests makes only a basic background.

Keywords: acidity, litter, bog birch forests, regression analysis.
