

УДК 631.417.2;631.445.12

## ОСОБЕННОСТИ ТРАНСФОРМАЦИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА СТВОЛОВОЙ ДРЕВЕСИНЫ ЕЛИ ПРИ ТОРФОГЕНЕЗЕ НА ЛЕСНЫХ БОЛОТАХ

© 2020 г. Т. Т. Ефремова<sup>а</sup>, \*, С. П. Ефремов<sup>а</sup>, А. Ф. Аврова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт 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 04.07.2019 г.

После доработки 07.09.2019 г.

Принята к публикации 06.06.2020 г.

Впервые в однотипных условиях водно-минерального питания и гидротермического режима изучена специфика разложения погребенного дебриса и мохового детрита на примере эутрофного лесного массива долинных горных торфяников юга Енисейской Сибири, занятых болотными ельниками. Оценка по критерию Вилкоксона универсальных показателей гумусного состояния (степень гумификации –  $\Sigma\text{ГК} + \Sigma\text{ФК}$ , тип гумуса – отношение  $C_{\text{ГК}} : C_{\text{ФК}}$ , биохимическая активность – отношение  $C : N$ ) показывает: в ходе торфогенеза за 600-летний период остатки моховой растительности и погребенные стволы ели различаются направленностью и темпами гумификации с высоким уровнем значимости. Установлена заторможенность процессов разложения органического вещества стволовой древесины, которая судя по отношению  $C : N$  45–77, слабой степени гумификации 31.8–33.4% и неизменному фульватно-гуматному типу гумуса за весь период погребения остается практически стабильной. Явные преобразования органического вещества дебриса обнаружены в перестройке фракционного состава преимущественно гуминовых кислот (ГК). Отчетливое повышение содержания ГК-3 сопровождается почти пропорциональным снижением количества (ГК-1 + ГК-2), в сумме которых бурые фракции (ГК-1) составляют 70–86%. Горизонты торфяного субстрата, сложенные остатками лесных зеленых и гипновых мхов, характеризовались в ходе торфогенеза узким отношением  $C : N$  в среднем равным 13.5, нарастающей со временем захоронения высокой степенью гумификации 34.4–54.9%, гуматно-фульватным типом гумуса за счет примерно пропорционального роста содержания всех фракций гумусовых кислот. Оптическая плотность гуминовых кислот торфяного субстрата и погребенных стволов ели характеризуется низким и очень низким уровнем соответственно и свидетельствует об упрощенной молекулярной структуре гуминовых кислот и слабее выраженном превращении разлагающейся древесины в гумусовые вещества.

*Ключевые слова:* горные лесные торфяники, гумусовые вещества, погребенная стволовая древесина, моховой детрит, фактор времени, Енисейская Сибирь.

DOI: 10.31857/S0024114820050058

Биосферная общепланетарная функция болот является в настоящее время общепризнанной. Вместе с тем процессы оторфовывания растительных остатков как ведущего фактора формирования болотных экосистем изучены не в полной мере, хотя имеют не только теоретическое, но и практическое значение. Исследования торфогенеза обеспечивают научную базу оценки продуктивности торфонакопления, направленного регулирования путей и скорости преобразования органического субстрата, хозяйственного освоения болот и природоохранных мероприятий.

К числу основных факторов, регулирующих скорость и характер гумификации, относят коли-

чество и химический состав растительных остатков, поступающих в почву (Александрова, 1980). Процессы разложения разнообразных видов торфа, хвои сосны, листьев березы, ольхи, ивы, разнотравья, папоротников, хвощей, мхов моделировались в лабораторных и природных условиях (Козловская и др., 1978; Domisch et al., 2000; Инишева, Дементьева, 2000; Laiho et al., 2004; Bragaza et al., 2007; Головацкая, Дюкарев, 2012; Миронычева-Токарева и др., 2012; и др.). Однако практически не изученной остается специфика разложения погребенной стволовой древесины, хотя на лесных болотах в составе надземной фитомассы 44–67% приходится на деревья (Елина, Кузнецова, 1977;

Медведева, 1978). По поводу ксилолиза на болотах высказан постулат: древесные стволы (валеж) вследствие минерализации и частичной гумификации гетеротрофными микроорганизмами, беспозвоночными животными, высшими и низшими грибами разрушаются преимущественно в торфогенном слое и только в малом количестве погребаются нарастающим торфом (Козловская, 1978; Пьявченко, 1978).

В то же время в лесах суходольных местообитаний микогенный ксилолиз изучается многими авторами. Внимание к процессу разложения древесных остатков вызвано широким обсуждением в последние годы проблем углеродного цикла в связи с глобальным изменением климата и все возрастающим пониманием роли крупных древесных остатков в сохранении биоразнообразия и возобновлении лесообразующих пород. Активно обсуждается бюджет углерода по пулу крупных древесных остатков (Замолотчиков, 2009; Трефилова и др., 2009; Мухортова, Ведрова, 2012), а также вклад грубых остатков древесины в цикл содержания биогенных элементов С, N, P, K, Mg (Laiho, Presscot, 1999; Mukhortova, 2012). Показано, что оценка скорости преобразования древесного субстрата выражается преимущественно через массу или плотность древесины по отношению к начальному уровню, совсем редко — через прямое определение потоков CO<sub>2</sub> вследствие минерализации субстрата, а краткосрочность наблюдений не в полном объеме отражает ход разложения остатков древесины (Карелин, Уткин, 2006). Вместе с тем известно, что разложение растительных остатков путем физического размельчения и минерализации сопровождается, благодаря биологическому воздействию, процессами гумификации, которые остаются, как правило, за рамками изучения деградации крупных древесных остатков. Сведения о продуктах гумификации древесного опада (стволов) практически отсутствуют.

Изложенный выше материал (реально не изученный ксилолиз валежа на болотах, не исследованные процессы гумификации крупных древесных остатков в лесах различных зон растительности, объективная краткосрочность наблюдений в силу длительности периода деградации валежа) дает основание говорить об актуальности представленной работы, дополняющей в определенной мере недостающую информацию по очерченному кругу вопросов.

Цель работы — в сравнительном плане оценить специфику разложения погребенной стволовой древесины и мохового субстрата в процессе торфонакопления на лесных болотах эвтрофного ряда развития за длительный временной период.

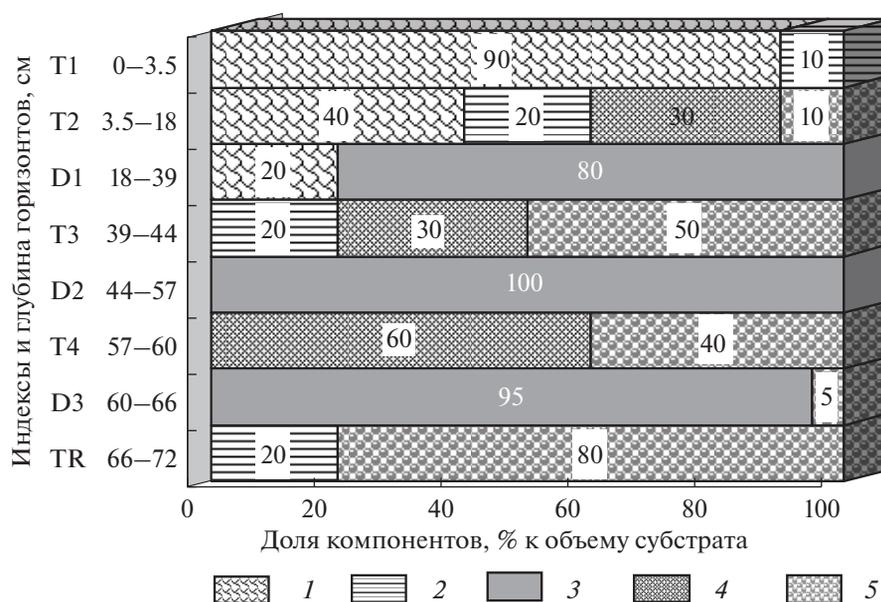
## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследовались лесоболотные экосистемы сопряженных бассейнов рек Белого Июса и Черного Июса в пределах восточного макросклона Кузнецкого Алатау (Республика Хакасия). В структуре лесов этой территории широко распространены болотные ельники по долинам рек, на торфяных и иловато-торфянистых берегах пресных озер и крупных ручьев, во влажных распадках и падах, по подножьям и пологим склонам гор на участках выклинивания ключевых вод. Морфоскульптурные вариации болотного рельефа как агенты формирования мерзлотных горизонтов и мозаичности торфяных почв во многом определяют и пространственное размещение растущих деревьев, образование сухостоя и валежа, который в ходе торфонакопления погребается в профиле нарастающей залежи.

Из общего числа 18 типизированных криогенных болотных ельников в качестве непосредственного объекта исследования остановились на эвтрофном торфяном массиве в заболоченной долине р. Тарча (приток р. Белый Июс) восточного макросклона Кузнецкого Алатау (абсолютная высота 547 м). В профиле оттаявшего берегового обнажения после тщательной зачистки вскрылись погребенные древесные остатки ели на глубине 18–39, 44–57 и 60–66 см, сохранившие внешние контуры стволов. В нашей многолетней практике исследования лесных болот остатки крупной дубрисы, погребенные в пределах торфяной залежи на разных глубинах, всецело не разрушенные деструктивными процессами, встретились впервые. Данное явление можно рассматривать как природный квазиэксперимент по разложению стволовой древесины в различные временные периоды торфогенеза.

Торфяник площадью 1.1 тыс. га занят ельником зеленомошно-гипново-осоковым. Микро-рельеф хорошо выражен и представлен кочкарно-бугорковыми комплексами фитогенного рельефа. В ассоциациях напочвенного растительного покрова преобладают следующие родовые группы: гипновая (*Aulacomnium*, *Tomentothyrium*, *Helodium*, *Drepanocladus*, *Mnium*, *Calliargon*), зеленомошная (*Hylocomium*, *Pleurozium*, *Retidiadelphus*, *Retidium*, *Polytrichum*, *Dicranum*, *Tuidium*, *Brium*), сосудистая (*Salix*, *Rosa*, *Ribes*, *Vaccinium*, *Carex*, *Equisetum*, *Zinnea*, *Chimaphilla*, *Androsace*, *Gymnocarpium*) и др.

Формула состава древостоя по запасу — 7Е 2Л 1П ед. КБ, где Е — ель, Л — лиственница, П — пихта, К — кедр, Б — береза. Тип возрастной структуры — разновозрастный (72–410 лет), полнота — 0.64, класс бонитета — V. Высоковозрастные деревья свидетельствуют о длительном временном периоде заселенности еловыми лесами долины р. Тарча. В ельнике достаточно заметна доля сухостоя — 142 против 1214 экз. га<sup>-1</sup> живых деревьев. Обилие су-



**Рис. 1.** Морфолого-генетическое строение профиля эвтрофного торфяного массива долины р. Тарча. Т – торфяной субстрат, D – погребенные стволы ели, TR – подстилающий органо-минеральный суглинок. 1 – моховые остатки, 2 – древесные остатки, 3 – стволовая древесина, 4 – гумусовая плазма, 5 – ореховато-зернистые макроагрегаты.

хих стволов, вероятнее всего, связано с активным проявлением почвенного криогенеза. По данным наших наблюдений, торфяная залежь долины р. Тарча только в конце августа оттаивает всего на глубину 40 см: совершенно очевиден теплоизолирующий эффект моховых дерновинки. Зондирование торфяного субстрата в летне-осенний период показало, что корневая система не только сухостоя, но и живых деревьев в большинстве случаев непосредственно соприкасается с устойчивой мерзлотой или находится на глубине низкотемпературных горизонтов. Показано, что длительный дефицит тепла и переувлажнение почвы снижают или даже блокируют деятельность корневых систем, ослабляя физиологическое состояние деревьев (Орлов, 1957). Ослабление в гидроморфно-криогенных условиях жизнеспособности еловых древостоев проявляется также в густом обрастании ветвей и стволов эпифитными видами корово-накипных лишайников и лишайниками-“бородачками”.

Морфолого-генетическое описание торфяной залежи и отбор образцов стволовой древесины и мохового торфа выполнены в пределах берегового обнажения р. Тарча (географические координаты 54°31'23" с.ш., 89°21'13" в.д.).

Количественный и качественный состав органического вещества погребенных растительных остатков проанализирован с использованием методики, разработанной для различных типов и видов торфа, включая низинный древесный (Пономарева, Николаева, 1959), физико-химические

показатели – согласно руководству (Аринушкина, 1962).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Торфяная залежь эвтрофного болота долины р. Тарча характеризуется средней мощностью 70 см. Она сложена чередующимися горизонтами торфа моховой группы и валежом стволовой древесины ели, легко распознаваемым по типичной клеточной структуре при ботаническом анализе (рис. 1). Термин “валеж” понимаем как частично или полностью погребенные в почвенных горизонтах, либо лежащие на поверхности древесные стволы (Карелин, Уткин, 2006).

Морфолого-генетические особенности. *Торфяные горизонты* (рис. 1). Поверхностный слой 0–3.5 см практически полностью слагается хорошо сохранившимися светло-бурыми остатками мезофитных и гигромезофитных лесных мхов (гилокомиум, томентиппун, гелодиум, ритидиальдифус, ритидиум, плевроциум и др.). Нижележащий горизонт менее однороден. Сокращена доля мхов, которые сильно фрагментированы и мацерированы, в зоне ризосферы сформирована сильно разложившаяся гумусированная растительная субстанция с элементами зернистой структуры, несколько возрос вклад размягченных древесных остатков (мертвых корней, сучьев и коры). По мере заглубления торф слагается темно-бурыми нераспознаваемыми растительными остатками, насыщенно гумифицированными (неагрегированная гумусовая плазма), рыхлого сложения за

**Таблица 1.** Ориентировочные временные периоды погребения стволов ели и мохового детрита в профиле долинного торфяника р. Тарча и радиоуглеродный возраст торфа примерно с тех же глубин на массиве Тунгжуль горно-долинных условий формирования

Расчетные данные по линейной скорости прироста торфа			Радиоуглеродное датирование		
индекс образца	глубина отбора торфа, см	возраст, лет	лабораторный номер	глубина отбора торфа, см	возраст, лет
T1	0–3.5	31	–	–	–
T2	3.5–18	160	–	–	–
D1	18–39	350	CO АН-9161	31–39	245 ± 35
T3	39–44	390	CO АН-9162	39–47	310 ± 40
D2	44–57	500	CO АН-9163	47–55	550 ± 40
T4	57–60	540	–	–	–
D3	60–66	600	CO АН-9164	62–68	620 ± 30

Примечание. Радиоуглеродное датирование выполнено на установке QUANTULUS 1220 в Лаборатории геологии и палеоклиматологии кайнозой Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН. Индекс образца: Т – торфяной субстрат, Д – стволовая древесина, “–” – нет данных.

счет непрочных мелкозернистых элементов структуры и прочных зернисто-ореховатых органо-минеральных отдельностей. Торфяная залежь по всему профилю освоена живыми корнями.

*Валеж.* В профиле торфяной залежи древесина ели в виде трех стволов залегает в горизонтах, различных по мощности и глубине. Глубина залегания погребенного дерева ориентировочно характеризует время его захоронения, мощность горизонта, скорее всего, исходный диаметр упавшего ствола. Первый, наибольший по мощности слой древесины (21 см), залегает на глубине 18–39 см. Это буро-желтая древесина, легко разделяемая в продольном направлении на мацерированные, непрочные волокна, вдоль которых наблюдается вращение живых корней вейников, характерны небольшие включения остатков мхов, в основном томентипнума и аулакомниума. Древесина менее мощного ствола (13 см) на глубине 44–57 см бурого цвета, мягкая, легко распадается на фрагменты горизонтальной направленности, несколько в большей мере относительно вышележащего ствола освоена живыми корнями вахты и осок. Наименее объемная (6 см) стволовая древесина придонного горизонта торфяной залежи (60–66 см) темно-бурого цвета, расщеплена на размягченные, механически непрочные тяжи от 1 до 10 см. Включает фрагменты мертвых корней. В виде следов содержит тонкую пылеватую фракцию и органо-минеральные агрегаты, характерны единичные живые корни. Таким образом, ярких качественных различий по морфологическим признакам в связи с давностью погребения дёриса не обнаружено, что, впрочем, отмечается и другими исследователями (Lombardi et al., 2008).

Прежде чем приступить к обсуждению физико-химических свойств и состояния органического вещества, оценим ориентировочные временные периоды торфонакопления в различных горизонтах профиля обсуждаемого торфяного массива. Установлено, что за последний почти тысячелетний период линейная скорость прироста торфа в болотных ельниках заторфованных речных долин восточного макросклона Кузнецкого Алатау составила в среднем  $1.12 \text{ мм год}^{-1}$  (Ефремова и др., 2018). Исходя из этих данных, сообразно глубине залегания валежа и горизонтов, сложенных преимущественно остатками мхов, рассчитали примерное время захоронения стволов ели и торфонакопления. Корректность полученных временных дат оценили, сравнивая датировки, выполненные радиоуглеродным методом на торфяном массиве Тунгжуль, сходном по ботаническому составу и глубине залегания горизонтов. Как следует из табл. 1, хронологические ряды принципиально не различаются между собой. Поэтому с определенной долей вероятности можно констатировать, что возраст погребения дёриса ориентировочно составил 350, 500 и 600 лет, торфяных пластов – от современного периода до 540 лет тому назад.

*Физико-химические свойства.* Торфяные горизонты эвтрофного массива долины р. Тарча характеризуются в основном зольностью значительно выше конституционной – 12% (табл. 2). Верхние 18 см имеют слабокислую реакцию среды и слабо насыщены Са + Mg, нижние горизонты – нейтральную среду и умеренно насыщены основаниями.

*Погребенная стволовая древесина* на фоне торфяного субстрата отличается слабой насыщенно-

**Таблица 2.** Физико-химические показатели эвтрофного торфяного массива долины р. Тарча, занятого ельником зеленомошно-гипновым

Индекс горизонта	Глубина, см	Зольность, %	Плотность, г см <sup>-3</sup>	pH <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	pH <sub>KCl</sub>	Насыщенность Ca + Mg, %
T1	0–3.5	13.12	0.064	5.6	5.1	51.5
T2	3.5–18	34.42	0.125	5.7	5	54.5
D1	18–39	4.95	0.040	5.9	5.3	60.1
T3	39–44	50.56	0.172	6.7	6.1	77.5
D2	44–57	18.61	0.079	6.8	6.1	79.3
T4	57–60	46.55	0.160	6.7	6.2	77.5
D3	60–66	6.43	0.044	6.2	5.5	67.4
TR	66–72	70.93	—	7.8	—	98.2

Примечание. Индекс горизонта: Т – моховой субстрат, Д – стволовая древесина ели, TR – органо-минеральный субстрат (заболачивающийся минеральный суглинок), “—” – нет данных.

стью основаниями, меньшей зольностью (в среднем на порядок), слабокислой реакцией среды. Плотность древесины по отношению к начальному уровню не погребенных стволов ели (0.45 г см<sup>-3</sup>) снижается преимущественно на порядок.

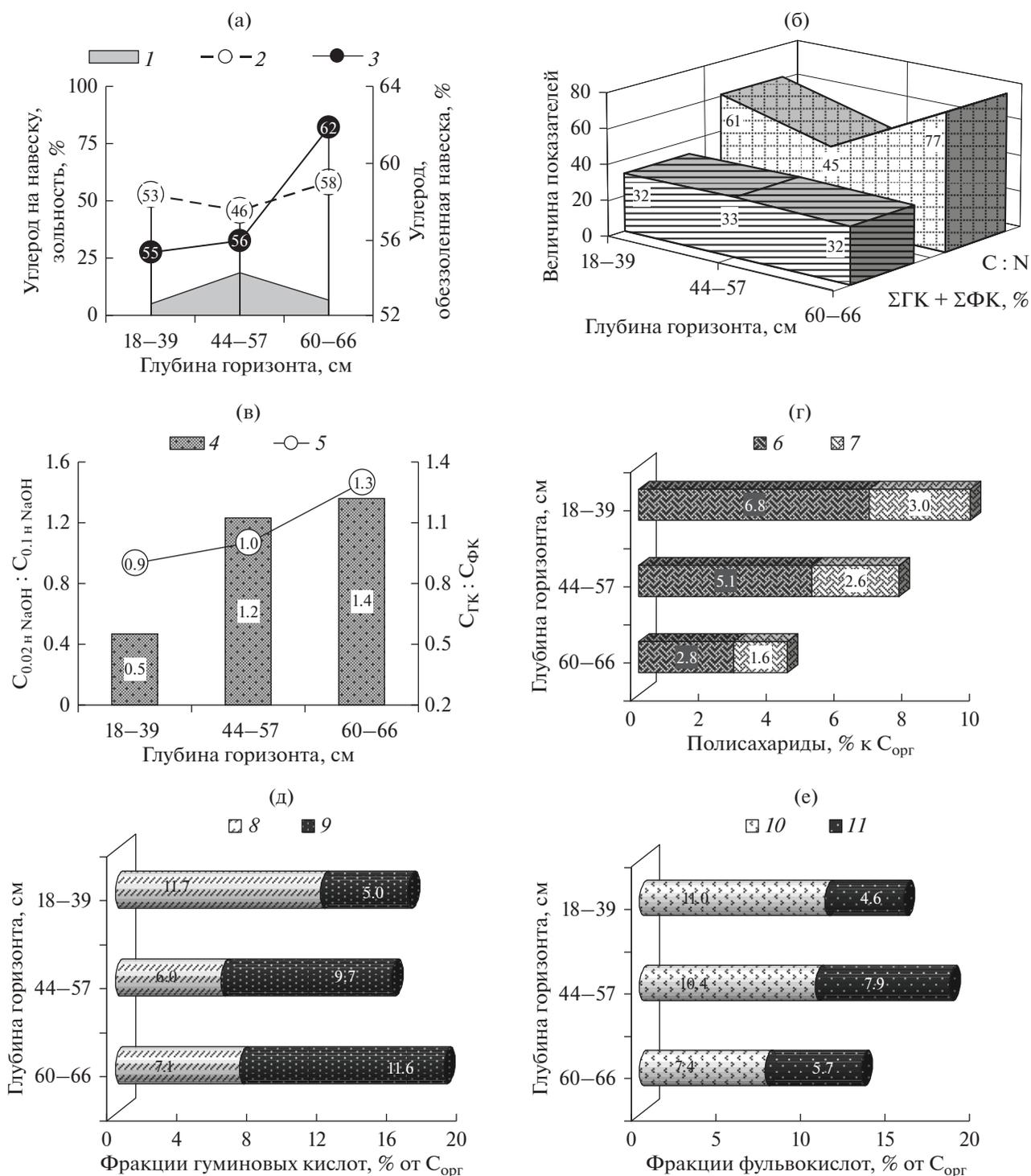
Состояние органического вещества. Исследования многих авторов показали, что химический состав растений, обусловленный видовым составом, и своеобразие условий среды, в которой протекают процессы разложения, оказывают большое влияние на формирование и интенсивность жизнедеятельности микробных ценозов, почвенных беспозвоночных, определяющих в конечном итоге скорость и характер разложения растительных остатков. На примере долинного торфяного массива р. Тарча представилась возможность сравнить специфику преобразования разного по составу растительного субстрата в пределах единого стратиграфического профиля эвтрофного болота, т.е. в однотипных условиях разложения моховых остатков и дебриса по характеру водно-минерального питания и гидротермического режима.

*Валеж.* Древесина и кора деревьев – наиболее устойчивый к разложению субстрат. Содержание углерода в древесных остатках ели изменяется в пределах 45.5–57.9% на навеску и определяется зольностью субстрата ( $r = -0.86$ ). В пересчете на беззольное вещество  $C_{орг}$  составляет 55.3–61.8%, т.е. за период примерно 250 лет (350–600 лет тому назад) повышается на 10–12%, обнаруживая тенденцию углефикации в стадии диагенеза (рис. 2а). Аналогичный тренд, но ускоренный во времени, установлен в условиях теплого и влажного климата Новой Зеландии: за 11-й период разложения стволов и пней сосны содержание углерода в них возросло с 52 до 55%, т.е. на 6% (Carret et al., 2008).

Количественные и качественные преобразования органического вещества растительных остат-

ков осуществляются, как известно, в основном биохимическим путем благодаря жизнедеятельности разнообразных организмов. Одним из показателей биологической активности среды принято считать соотношение C : N в опаде, которое благоприятно в пределах значений 20–30 (Аристовская, 1980). В погребенных стволах ели этот показатель намного выше 45–77 (рис. 2б). Максимальное соотношение C : N выявлено на глубине 60–66 см (срок погребения – примерно 600 лет тому назад). Расширение отношения обусловлено в большей мере углефикацией дебриса, в меньшей – количеством азота, которое в стволах ели различных глубин залегания довольно устойчиво (0.8–1.0%), что отмечается и другими авторами (Palviainen, 2008). В течение всего периода разложения погребенные стволы ели обнаруживают практически стабильные темпы формирования гумусовых веществ (рис. 2б). Степень гумификации ( $\Sigma ГК + \Sigma ФК$ ) варьирует в пределах 31.8–33.4% от  $C_{общ}$ , тесно связана с широким отношением C : N ( $r = -0.97$ ) и оценивается как слабая (по: Ефремова, 1992). Сохраняется также устойчивость показателей  $C_{ГК} : C_{ФК}$  (0.9–1.3), характеризующих фульватно-гуматный тип гумуса (рис. 2в). Таким образом, генерализованные показатели гумусного состояния погребенной древесины в гидроморфных и гидроморфно-криогенных условиях залегания характеризуют заторможенность процессов преобразования органического вещества, в том числе вследствие обеднения дебриса азотом и минеральными компонентами, несмотря на благоприятную нейтральную и слабокислую реакцию субстрата.

Явно выраженные изменения в преобразовании органического вещества дебриса со временем погребения связаны с резким снижением количества гемицеллюлоз и целлюлозы – соответственно в 2.4 и 1.8 раза (рис. 2г) и перестройкой фрак-



**Рис. 2.** Гумусное состояние погребенной стволковой древесины ели в профиле эвтрофного болотного массива долины р. Тарча. (а) – зольность и содержание углерода; (б) – степень гумификации и показатель биологической активности; (в) – соотношение фракций гумусовых веществ и тип гумуса; (г) – полисахариды, (д) – фракции гуминовых кислот; (е) – фракции фульвокислот. 1 – зольность, 2 – углерод на навеску, 3 – углерод на обеззоленное вещество, 4 – соотношение  $C_{0,02 \text{ н NaOH}} : C_{0,1 \text{ н NaOH}}$  после декальцирования, 5 – отношение  $C_{ГК} : C_{ФК}$ , 6 – гемиллюлозы, 7 – целлюлоза, 8 – (ГК-1 + ГК-2), 9 – ГК-3, 10 – фульвокислоты (ФК-1 + ФК-2), 11 – ФК-3.

ционного состава гумифицированных продуктов. В древесном субстрате на фоне снижения фракций (1 + 2), извлекаемых 0.1 нормальным раствором NaOH после декальцирования, увеличивается содержание 3-й, пептизируемой 0.02 нормальным раствором NaOH на водяной бане (рис. 2в). Значительный скачок (почти в 3 раза) относительно верхнего горизонта залегания древесины (18–39 см) наблюдается на глубине 44–57 см (период с 350 до 500 лет тому назад) и ярко проявляется в группе гуминовых кислот. Отчетливое повышение содержания ГК-3 сопровождается почти пропорциональным снижением количества (ГК-1 + ГК-2), в сумме которых бурые фракции (ГК-1) составляют 70–86% (рис. 2д). Аналогичный тренд просматривается и в группе фульвокислот, но процесс накопления ФК-3 с глубиной залегания древесных стволов выражен слабее (рис. 2е).

Показано: гуминовые кислоты 1-й фракции по сравнению с 3-й характеризуются повышенным содержанием углерода и кислорода, меньшим содержанием водорода, отношение Н : С, О : С и степень окисленности молекул характеризуют 3-ю фракцию гуминовых как более восстановленную (Ефремова, 1992). Гельхроматограммы отражают повышенную полидисперсность ГК-3. Состав структурных единиц макромолекул гуминовых кислот 1-й фракции отличается от ГК-3 сильнее выраженной ароматической структурой, меньшим или равным содержанием гидроксильных и аминных групп, более высоким содержанием амидных и карбоксильных. Нарастание кислородсодержащих функциональных групп, прежде всего карбоксиллов, увеличивает растворимость гуминовых кислот (Орлов, 1974). Как результат подтверждается более высокая подвижность (растворимость) ГК-1 относительно ГК-3, а усиливающаяся вниз по профилю (с возрастом) гидрофобность гуминовых кислот фракции 3 может рассматриваться в качестве одной из причин их накопления в глубинных пластах залежи.

*Торфяной субстрат.* В горизонтах, сложенных преимущественно остатками мхов, содержание углерода на навеску изменяется в пределах 25.4–45.8%, снижаясь с глубиной (рис. 3а). Количество углерода отрицательно связано с зольностью торфа ( $r = -0.98$ ), обусловленного главным образом алювиальными наносами, объем которых нарастает с глубиной, косвенно характеризую продолжительность торфогенеза. Пересчитанное на беззольное вещество содержание углерода остается в пределах толщи 60 см (~540 лет) практически постоянным и составляет 51.3–53.4%.

Высокозольный, обогащенный азотом (1.8–3.6%), торфяной массив долины р. Тарча активно осваивается микроорганизмами: влияние трофности на увеличение видового разнообразия ор-

ганизмов, их численности и биомассы – установленный факт (Козловская и др., 1978). Горизонты, сложенные моховым детритом, отличаются высокой биохимической активностью, судя по косвенному показателю – узкому отношению С : N (рис. 3б), отрицательно коррелирующему с зольностью растительного субстрата ( $r = -0.94$ ) и суммой гумусовых компонентов ( $r = -0.87$ ). Гумусовые вещества, в свою очередь, тесно положительно коррелируют с зольностью моховых растительных остатков ( $r = 0.96$ ). С глубиной (возрастом погребения) содержание ( $\Sigma\text{ГК} + \Sigma\text{ФК}$ ) постепенно увеличивается до 55% от  $C_{\text{общ}}$  и характеризует высокую степень преобразования мохового детрита. Увеличение степени гумификации по мере давности захоронения сопровождается снижением количества полисахаридов в среднем на 40% (рис. 3г).

В группе гуминовых кислот доминирует 3-я фракция, в среднем 59.8% к сумме ГК, на долю (ГК-1 + ГК-2) приходится 40.2% (рис. 3д). В ходе торфогенеза активное повышение содержания гуминовых кислот в моховом детрите отмечается на глубине 3.5–18 см, т.е. ориентировочно 160 лет тому назад. В последующие 230 лет количество гуминовых кислот сохранялось практически на одном уровне. К возрасту погребения 540 лет содержание обеих фракций относительно поверхностного горизонта увеличилось на 80% (рис. 3д). В группе фульвокислот, напротив, преобладают фракции (ФК-1 + ФК-2) – 62.4% к сумме ФК, участие ФК-3 составляет 37.3%. Содержание фракций со временем захоронения изменялось по-разному (рис. 3е). Количество (ФК-1 + ФК-2) относительно поверхностного слоя последовательно возрастало с глубиной и максимально увеличилось на 70% спустя примерно 390 лет. В течение последующих 150 лет оно сохранялось практически на этом уровне. Фракция ФК-3 более инертна: увеличение содержания на 25% наблюдается только после 540 лет погребения. Благодаря особенностям накопления гуминовых и фульвокислот в ходе торфогенеза соотношение фракций гумусовых веществ ( $C_{0.02 \text{ н NaOH}} : C_{0.1 \text{ н NaOH}}$ ) практически не изменяется в течение всего периода погребения (рис. 3в). Сохраняется также постоянным гуматно-фульватный тип гумуса: отношение  $C_{\text{ГК}} : C_{\text{ФК}}$  0.6–0.9.

Оценка универсальных критериев гумусного состояния по критерию Вилкоксона показывает: в ходе торфогенеза за 600-летний период остатки моховой растительности и погребенные стволы ели различаются направленностью и темпам гумификации с высоким уровнем значимости. В горизонтах, сложенных моховым субстратом, отношение С : N (косвенный показатель биологической активности) составляет в среднем 13.5, в погребенных стволах ели расширяется до 61 ( $p$ -уро-

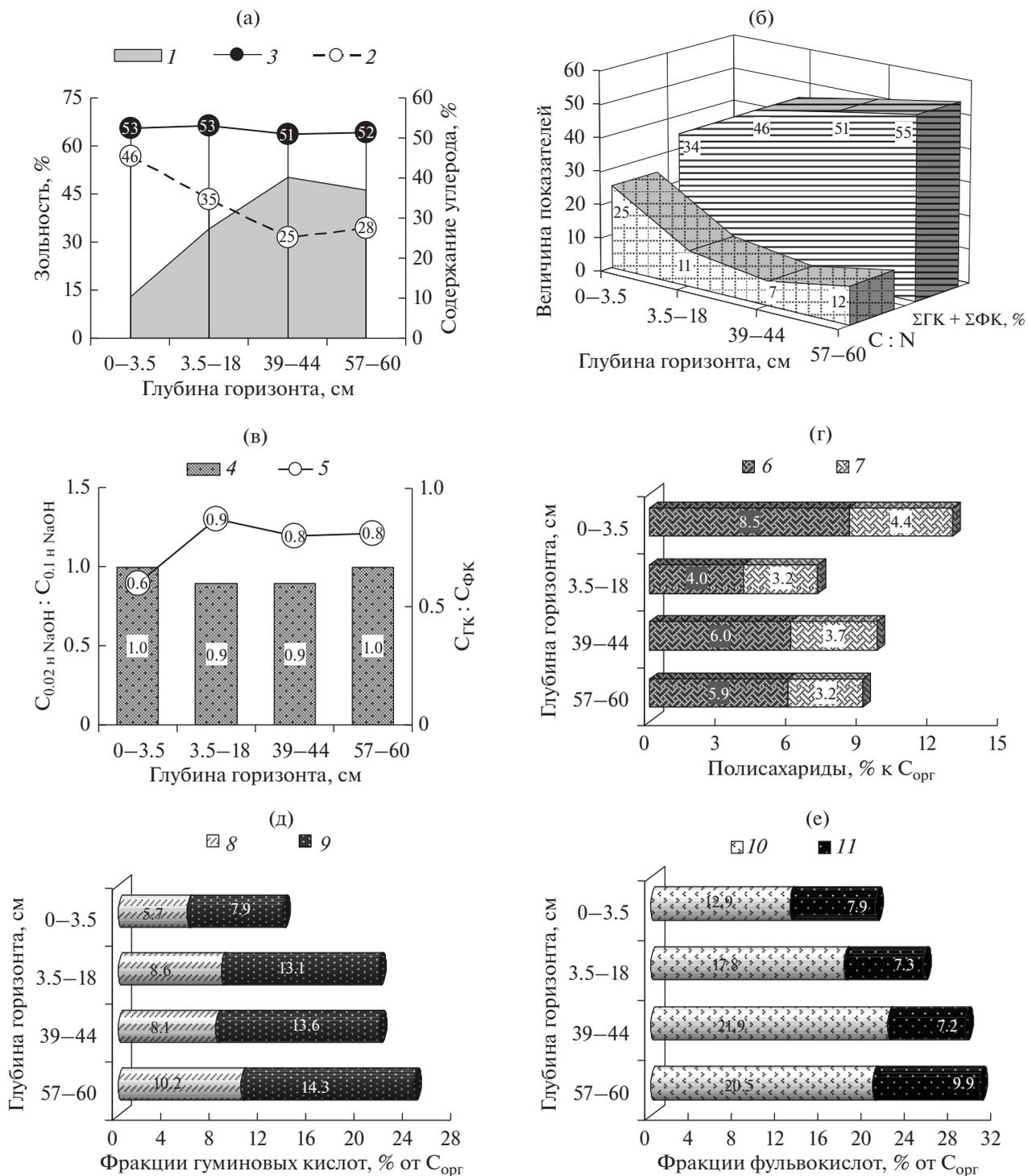


Рис. 3. Гумусное состояние мохового торфа в профиле эвтрофного болотного массива долины р. Тарча. Обозначения см. рис. 2.

вень значимости различий – 0.002). Отношение  $C_{ГК} : C_{ФК}$  (показатель типа гумуса) в моховом детрите – 0.8, в стволовой древесине – 1.2 ( $p$ -уровень значимости различий – 0.009). Степень гумифи-

кации ( $\Sigma ГК + \Sigma ФК$ ) моховых растительных остатков составляет в среднем 46.6%, дебриса – 32.5% ( $p$ -уровень – 0.022), что вполне закономерно. Показано, что органические остатки, богатые

**Таблица 3.** Оптическая плотность различных фракций гуминовых кислот эвтрофной почвы торфяного долинного массива р. Тарча,  $E_{465 \text{ нм}, 1 \text{ см}}^{0.001\% \text{ C}}$

Индекс горизонта	Глубина, см	Гуминовые кислоты, извлекаемые 0.1 нормальным раствором NaOH после декальцирования		Гуминовые кислоты, пептизируемые 0.02 нормальным раствором NaOH на водяной бане	
		оптическая плотность	уровень признака	оптическая плотность	уровень признака
T1	0–3.5	0.053	Низкий	0.089	Низкий
T2	3.5–18	0.068	Низкий	0.056	Низкий
D1	18–39	0.029	Очень низкий	0.036	Очень низкий
T3	39–44	0.09	Низкий	0.060	Низкий
D2	44–57	0.045	Очень низкий	0.043	Очень низкий
T4	57–60	0.077	Низкий	0.076	Низкий
D3	60–66	0.049	Очень низкий	0.051	Очень низкий

Обозначения горизонтов см. табл. 2.

лигнино-целлюлозными компонентами, гумифицируются медленно и образуют значительно меньше гумусовых кислот (Александрова, 1980).

Гумусовые компоненты разлагающихся стволов ели и моховых растительных остатков различаются также коэффициентами экстинкции гуминовых кислот ( $E_{465 \text{ нм}, 1 \text{ см}}^{0.001\% \text{ C}}$ ). Согласно классическому представлению,  $E$ -величины характеризуют соотношение углерода ароматического ядра и углерода боковых цепей (Орлов, 1990). Как следует из табл. 3, оптическая плотность гуминовых кислот мохового торфа и погребенной древесины характеризуется соответственно низким и очень низким уровнем (оценка по: Орлов и др., 2004). Такой характер признака свидетельствует об упрощенной молекулярной структуре гуминовых кислот и слабее выраженного превращения разлагающейся древесины в гумусовые вещества. По структуре молекулы гуминовых кислот лесные торфяные почвы горных долинных торфяников сопоставимы с лесными бурыми и серыми лесными почвами, а также с тундровыми и дерново-подзолистыми.

**Заключение.** Впервые изучена специфика гумификации погребенной ствольной древесины относительно мохового субстрата в профиле эвтрофного болота за длительный временной период в горных долинных торфяниках юга Енисейской Сибири, занятых болотными ельниками. Установлено, что в ходе торфогенеза остатки моховой растительности и погребенные стволы ели статистически достоверно различаются направленностью и темпами гумификации.

Стволовые остатки ели за время преобразования (приблизительно с 350 до 600 лет тому назад)

характеризуются устойчиво низкой биохимической активностью, судя по широкому отношению C : N (45–77), практически стабильной, низкой степени гумификации (31.8–33.4%) и неизменным типом гумуса – фульватно-гуматным. Специфика трансформации органического вещества дебриса четко проявляется в преобразовании фракционного состава гумусовых веществ. На фоне снижения в 1.5 раза продуктов гумификации, извлекаемых 0.1 нормальным раствором NaOH после декальцирования, наблюдается примерно пропорциональный рост 3-й фракции, пептизируемой на водяной бане 0.02 нормальным раствором NaOH, главным образом за счет гуминовых кислот. В возрасте около 600 лет наступает момент углефикации ствольных остатков древесины.

Торфяные горизонты, сложенные в основном остатками лесных гигромезофитных и гипновых гигрофитных мхов, за период от текущего времени до примерно 500 лет тому назад характеризуются высокой обогащенностью азотом, узким отношением C : N (в среднем 13.5), нарастающей с глубиной, т.е. со временем погребения, высокой степенью гумификации (34.4–54.9%) за счет примерно равного увеличения количества всех фракций гуминовых и фульвокислот. В итоге сохраняется определенное постоянство в соотношении фракций гумусовых веществ, тип гумуса – гуматно-фульватный, а также содержание  $C_{\text{орг}}$  на уровне 53% к обеззоленной навеске в течение всего периода разложения моховых остатков.

Оптическая плотность гуминовых кислот торфяного субстрата и погребенных стволов ели характеризуется низким и очень низким уровнем соответственно, что свидетельствует об их упро-

щенной молекулярной структуре и слабее выраженного превращения разлагающейся древесины в гумусовые вещества.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александрова Л.Н.* Органическое вещество почвы и процессы его трансформации. Л.: Наука, 1980. 288 с.
- Ариунушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Московского университета, 1962. 491 с.
- Аристовская Т.В.* Микробиология процессов почвообразования. Л.: Наука, 1980. 187 с.
- Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А.* Углеродный баланс болотных экосистем на примере Бакчарского болота // Исследование природно-климатических процессов на территории Большого Васюганского болота. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. С. 136–147.
- Елина Г.А., Кузнецова О.Л.* Биологическая продуктивность болот Карелии // Стационарное изучение болот и заболоченных лесов в связи с осушительной мелиорацией. Петрозаводск: Изд-во Карельский филиал АН СССР, 1977. С. 105–123.
- Ефремова Т.Т.* Почвообразование и диагностика торфяных почв болотных экосистем // Почвоведение. 1992. № 12. С. 25–35.
- Ефремова Т.Т., Аврова А.Ф., Ефремов С.П.* Пространственная дифференциация содержания углерода в торфяных почвах болотных ельников восточного макросклона Кузнецкого Алатау // Лесоведение. 2018. № 4. С. 273–284.
- Замолодчиков Д.Г.* Оценка пула углерода крупных древесных остатков в лесах России с учетом влияния пожаров и рубок // Лесоведение. 2009. № 4. С. 3–15.
- Инишева Л.И., Дементьева Т.В.* Скорость минерализации органического вещества торфов // Почвоведение. 2000. № 2. С. 196–203.
- Карелин Д.В., Уткин А.И.* Скорость разложения крупных древесных остатков в лесных экосистемах // Лесоведение. 2006. № 2. С. 26–33.
- Козловская Л.С.* Разложение древесины // Динамика органического вещества в процессе торфообразования. Л.: Наука, 1978. С. 75–78.
- Козловская Л.С., Медведева В.М., Пьявченко Н.И.* Динамика органического вещества в процессе торфообразования. Л.: Наука, 1978. 176 с.
- Медведева В.М.* Биологическая продуктивность заболоченных лесов и болот // Динамика органического вещества в процессе торфообразования. Л.: Наука, 1978. С. 4–24.
- Мироньчева-Токарева Н.П., Косых Н.П., Вишнякова Е.К.* Продукционно-деструкционные процессы в болотных комплексах Большого Васюганского болота // Исследование природно-климатических процессов на территории Большого Васюганского болота. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. С. 147–158.
- Мухортова Л.В., Ведрова Э.Ф.* Вклад крупных древесных остатков в динамику запасов органического вещества послерубочных лесных экосистем // Лесоведение. 2012. № 6. С. 55–62.
- Орлов А.Я.* Наблюдения над сосущими корнями ели (*Picea excelsa* Link.) в естественных условиях // Ботанический журн. 1957. Т. 42. № 8. С. 1172–1181.
- Орлов Д.С.* Гумусовые кислоты почв. М.: Изд-во Московский университет, 1974. 332 с.
- Орлов Д.С.* Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд-во МГУ, 1990. 325 с.
- Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Розанова М.С.* Дополнительные показатели гумусного состояния почв и их генетических горизонтов // Почвоведение. 2004. № 8. С. 918–920.
- Пономарева В.В., Николаева Т.А.* К методике изучения органического вещества в торфяно-болотных почвах // Современные почвенные процессы в лесной зоне Европейской части СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 170–203.
- Пьявченко Н.И.* Торфонакопление и его продуктивность // Динамика органического вещества в процессе торфообразования. Л.: Наука, 1978. С. 141–156.
- Трефилова О.В., Ведрова Э.Ф., Оскорбин П.А.* Запас и структура крупных древесных остатков в сосняках Енисейской равнины // Лесоведение. 2009. № 4. С. 16–23.
- Bragazza L., Siffi C., Iacumin P., and Gerdol R.* Mass loss and nutrient release during litter decay in peatland: The role of microbial adaptability to litter chemistry // Soil Biology & Biochemistry. 2007. V. 39. P. 257–267.
- Carret L.G., Oliver G.R., Pearce S.H., Davis M.R.* Decomposition of *Pinus radiata* coarse woody debris in New Zealand // Forest Ecology and Management. 2008. V. 255. № 11. P. 3839–3845.
- Domisch T., Finer L., Laiho R., Karsisto M., and Laine J.* Decomposition of Scots pine litter and the rate of released carbon in pristine and drained pine mires // Soil Biology & Biochemistry. 2000. V. 32. P. 1571–1580.
- Laiho R., Prescott C.E.* The contribution of coarse woody debris to carbon, nitrogen, and phosphorus cycles in three Rocky Mountain coniferous forests // Canadian J. Forest Research. 1999. V. 29. P. 1592–1603.
- Laiho R., Laine J., Trettin C.C., Finér L.* Scots pine litter decomposition along drainage succession and soil nutrient gradients in peatland forests, and the effects of inter-annual weather variation // Soil Biology & Biochemistry. 2004. V. 36. P. 1095–1109.
- Lombardi F., Cherubini P., Lasserre B., Tognetti R., Marchetti M.* Tree rings used to assess time since death of deadwood of different decay classes in beech and silver fir forests in the central Apennines (Molise, Italy) // Canadian J. Forest Research. 2008. V. 38. № 4. P. 821–823.
- Mukhortova L.V.* Carbon and nutrient release during decomposition of coarse woody debris in forest ecosystems of Central Siberia // Folia Forestalia Polonica. Series A. 2012. V. 54. № 2. P. 71–83.
- Palviainen M., Laiho R., Mäkinen H., Finer L.* Do decomposing Scots pine, Norway spruce, and Silver birch stems retain nitrogen? // Canadian J. Forest Research. 2008. V. 38. № 12. P. 3047–3055.

## The Specifics of Spruce Trunks' Organic Matter Transformation during the Peat-forming Process in Forest Swamps

T. T. Yefremova<sup>1,\*</sup>, S. P. Yefremov<sup>1</sup>, and A. F. Avrova<sup>1</sup>

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

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

For the first time the specifics of buried debris and moss detritus decomposition was studied within the similar water, mineral and hydrothermal conditions on the example of eutrophic forest peat valleys of the south of Yenisey Siberia, covered by the swamp spruce forests. Using the Wilcoxon criterion the universal humus indices (humification rate –  $\sum HA + \sum FA$ , type of humus –  $C_{HA} : C_{FA}$  ratio, biochemical activity – C : N ratio) it was shown that during the peat forming over a 600-years period, the remains of moss and buried spruce trunks differ significantly in speed and overall direction of the humification process. The decomposition process of the tree trunks organics was found to be slow, and because of the C : N ratio of 45–77, low humification rate of 31.8–33.4% and constantly fulvic-humic type of humus it can be assumed to remain almost stable over the whole period. Evident transformation of the debris' organic matter was found in the reorganization of the fraction composition of the humic acids most of all. Significant increase of HA-3 concentration is accompanied by the almost proportional decrease of (HA-1 + HA-2), where the rate of the brown fraction (HA-1) constitute 70–86%. Peat substrate horizons, comprised of the remains of the green forest mosses and hypnales mosses, were characterised by the narrow C : N ratio, equal 13.5 on average, and a high (34.4–54.9%) humification rate, further increasing over the exposition period, humic-fulvic type of humus due to almost equal concentrations of all kinds of the humus acids. Optical density of humic acids of the peat substrate and buried spruce trunks is on a low and very low levels respectively and indicates a simple structure of humic acids and lower rate of transformation of the rotting wood into a humus matter.

*Keywords: mountainous forests peatbogs, humus matter, buried trunk wood, moss detritus, temporal factor, Yenisey Siberia.*

### REFERENCES

- Aleksandrova L.N., *Organicheskoe veshchestvo pochvy i protsessy ee transformatsii* (Organic matter of soils and the soil transformation), Leningrad: Nauka, 1980, 287 p.
- Arinushkina E.V., *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochvy* (Handbook on chemical analysis of soils), M.: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1962, 491 p.
- Aristovskaya T.V., *Mikrobiologiya protsessov pochvoobrazovaniya* (Microbiology of the pedogenic processes), Leningrad: Nauka, 1980, 187 p.
- Bragazza L., Siffi C., Iacumin P., Gerdol R., Mass loss and nutrient release during litter decay in peatland: The role of microbial adaptability to litter chemistry, *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, Vol. 39, pp. 257–267.
- Carret L.G., Oliver G.R., Pearce S.H., Davis M.R., Decomposition of *Pinus radiata* coarse woody debris in New Zealand, *Forest Ecology and Management.*, 2008, Vol. 255, No. 11, pp. 3839–3845.
- Domisch T., Finer L., Laiho R., Karsisto M., Laine J., Decomposition of Scots pine litter and the rate of released carbon in pristine and drained pine mires, *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, Vol. 32, pp. 1571–1580.
- Efremova T.T., Avrova A.F., Efremov S.P., Prostranstvennaya differentsiatsiya sodержaniya ugleroda v torfyanykh pochvakh bolotnykh el'nikov vostochnogo makrosklona Kuznetskogo Alatau (Spatial varyety of carbon storages of peat soils of paludified spruce forests on eastern slopes of Kuznetskiy Alatau), *Lesovedenie*, 2018, No. 4, pp. 273–284.
- Efremova T.T., Pochvoobrazovanie i diagnostika torfyanykh pochv bolotnykh ekosistem (Pedogenesis and diagnostics of peat soils of bog ecosystems), *Pochvovedenie*, 1992, No. 12, pp. 25–35.
- Elina G.A., Kuznetsov O.L., Biologicheskaya produktivnost' bolot yuzhnoi Karelii (Biological productivity of bogs in southern Karelia), In: *Statsionarnoe izuchenie bolot i zabolochennykh lesov v svyazi s melioratsiei* (Stationary studies of bogs and paludified forests under melioration), Petrozavodsk: Izd-vo Karel'skogo filiala AN SSSR, 1977, pp. 105–126.
- Golovatskaya E.A., Dyukarev E.A., Uglernodnyi balans bolotnykh ekosistem na primere Bakcharskogo bolota (Carbon balance of swamp ecosystems on the example of the Bakchar swamp), In: *Issledovanie prirodno-klimaticheskikh protsessov na territorii Bol'shogo Vasyuganskogo bolota* (The study of climatic processes in the territory of the Great Vasyugan swamp), Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2012, pp. 136–147.
- Inisheva L.I., Dement'eva T.V., Mineralization rate of organic matter in peats, *Eurasian Soil Science*, 2000, Vol. 33, No. 2, pp. 170–176.
- Karelin D.V., Utkin A.I., Skorost' razlozheniya krupnykh drevesnykh ostatkov v lesnykh ekosistemakh (Decomposition rate of coarse wood debris in forest ecosystems), *Lesovedenie*, 2006, No. 2, pp. 26–33.
- Kozlovskaya L.S., Medvedeva V.M., P'yavchenko N.I., *Dinamika organicheskogo veshchestva v protsesse torfoobrazovaniya* (Organic matter dynamics during peat formation), Leningrad: Nauka, 1978, 172 p.
- Kozlovskaya L.S., Razlozhenie drevesiny (Wood decomposition), In: *Dinamika organicheskogo veshchestva v protsesse torfoobrazovaniya* (Organic matter dynamics during peat formation), Leningrad: Nauka, 1978, pp. 75–78.
- Laiho R., Laine J., Trettin C.C., Finér L., Scots pine litter decomposition along drainage succession and soil nutrient

- gradients in peatland forests, and the effects of inter-annual weather variation, *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, Vol. 36, pp. 1095–1109.
- Laiho R., Presscott C.E., The contribution of coarse woody debris to carbon, nitrogen, and phosphorus cycles in three Rocky Mountain coniferous forests, *Canadian J. Forest Research*, 1999, Vol. 29, pp. 1592–1603.
- Lombardi F., Cherubini P., Lasserre B., Tognetti R., Marchetti M., Tree rings used to assess time since death of deadwood of different decay classes in beech and silver fir forests in the central Apennines (Molise, Italy), *Canadian J. Forest Research*, 2008, Vol. 38, No. 4, pp. 821–823.
- Medvedeva V.M., Biologicheskaya produktivnost' zabolochennykh lesov i bolot (Biological productivity of paludified forests and bogs), In: *Dinamika organicheskogo veshchestva v protsesse torfoobrazovaniya* (Organic matter dynamics during peat formation), Leningrad: Nauka, 1978, pp. 8–32.
- Mironycheva-Tokareva N.P., Kosykh N.P., Vishnyakova E.K., Produktionno-destruktsionnye protsessy v bolotnykh kompleksakh Bol'shogo Vasyuganskogo bolota (Production and destruction processes in the swamp complexes of the Great Vasyugan Mire), In: *Issledovanie prirodno-klimaticheskikh protsessov na territorii Bol'shogo Vasyuganskogo bolota* (The study of climatic processes in the territory of the Great Vasyugan swamp), Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2012, pp. 147–158.
- Mukhortova L., Carbon and nutrient release during decomposition of coarse woody debris in forest ecosystems of Central Siberia, *Folia Forestalia Polonica. Series A – Forestry*, 2012, Vol. 54, No. 2, pp. 73–81.
- Mukhortova L.V., Vedrova E.F., Vklad krupnykh drevesnykh ostatkov v dinamiku zapasov organicheskogo veshchestva poslerubochnykh lesnykh ekosistem (Contribution of Coarse Woody Debris to Organic Matter Reserves in Forest Ecosystems of Secondary Successions after Cuttings), *Lesovedenie*, 2012, No. 6, pp. 55–62.
- Orlov A.Y., Nablyudeniya nad sosushchimi kornyami eli (*Picea excelsa* Link.) v estestvennykh usloviyakh (Study of absorbing roots of spruce (*Picea excelsa* Link.) in natural surroundings), *Botanicheskii zhurnal*, 1957, Vol. 42, No. 8, pp. 1172–1181.
- Orlov D.S., Biryukova O.N., Rozanova M.S., Revised system of the humus status parameters of soils and their genetic horizons, *Eurasian Soil Science*, 2004, Vol. 37, No. 8, pp. 798–805.
- Orlov D.S., *Gumusovye kisloty pochv* (Soil humic acids), M.: Izd-vo Moskovskii universitet, 1974, 332 p.
- Orlov D.S., *Gumusovye kisloty pochv i obshchaya teoriya gumifikatsii* (Soil humic acids and the general theory of humification), M.: Izd-vo MGU, 1990, 325 p.
- Palviainen M., Laiho R., Mäkinen H., Finer L., Do decomposing Scots pine, Norway spruce, and Silver birch stems retain nitrogen?, *Canadian J. Forest Research*, 2008, Vol. 38, No. 12, pp. 3047–3055.
- Ponomareva V.V., Nikolaeva T.A., K metodike izucheniya organicheskogo veshchestva v torfyano-bolotnykh pochvakh (To the method of studying organic matter in peat-bog soils), In: *Sovremennye pochvennye protsessy v lesnoi zone Evropeiskoi chasti SSSR* (Modern soil processes in the forest zone of the European part of the USSR), Moscow: Izd-vo AN SSSR 1959, pp. 170–203.
- P'yavchenko N.I., Torfonakoplenie i ego produktivnost' (Peat accumulation and its productivity), In: *Dinamika organicheskogo veshchestva v protsesse torfoobrazovaniya* (The dynamics of organic matter in the process of peat formation), Leningrad: Nauka, 1978, pp. 141–156.
- Trefilova O.V., Vedrova E.F., Oskorbin P.A., Zapas i struktura krupnykh drevesnykh ostatkov v sosnyakh Eniseiskoi ravniny (The stock and structure of coarse woody debris in pine forests of the Yenisei Plain), *Lesovedenie*, 2009, No. 4, pp. 16–23.
- Zamolodchikov D.G., Otsenka pula ugleroda krupnykh drevesnykh ostatkov v lesakh Rossii s uchetom vliyaniya pozharov i rubok (An estimate of the carbon pool of coarse woody debris in forests of Russia with fire and cuts impact included), *Lesovedenie*, 2009, No. 4, pp. 3–15.