

Амфифильные свойства почвенного органического вещества в первые годы после рубки древостоя

© 2026. В. В. Старцев, к. б. н., н. с.,

А. А. Дымов, д. б. н., зав. отделом,

Институт биологии ФИЦ Коми научного центра УрО РАН,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

e-mail: vik.startsev@gmail.com

В работе представлены данные по амфифильности органического вещества подзолистых почв (Retisols) после сплошнолесосечной рубки с применением многооперационных комплексов харвестер/форвардер. Исследование проводилось на разных технологических элементах вырубki: пасечный участок и волока (3П – три прохода лесозаготовительной техники, 10П – десять проходов, 10Р – с последующим выравниванием). Для изучения амфифильных свойств почвенного органического вещества (ПОВ) был использован метод хроматографии гидрофобного взаимодействия. Установлено, что для всех участков наблюдается высокое содержание гидрофильных фракций ПОВ, отличающихся высокой миграционной и реакционной способностью, как в подстилках, так и в минеральных горизонтах. Их доля увеличивается в процессе лесовозобновления. Гидрофобные фракции, состоящие из лигнинсодержащих соединений, имеют высокую степень корреляции с общим содержанием углерода в почве ($r = 0,69-0,77, p < 0,05$), общим содержанием азота ($r = 0,66-0,79, p < 0,05$) и водорастворимой фракцией углерода ($r = 0,45-0,74, p < 0,05$). Показано, что органическое вещество чутко реагирует на антропогенную нагрузку на уровне содержания амфифильных фракций, поскольку они существенно различаются от исходных показателей после сплошнолесосечной рубки. Происходит накопление гидрофобных лигнинсодержащих фракций, образующихся в результате разложения растительных остатков, в почвах волоков вследствие механического перемешивания верхних минеральных горизонтов с подстилкой после прохождения тяжёлой колёсной техники.

Ключевые слова: сплошная рубка, хроматография гидрофобного взаимодействия, подзолистые почвы.

Amphiphilic properties of soil organic matter in the first years after stand cutting

© 2026. V. V. Startsev ORCID: 0000-0002-6425-6502

A. A. Dymov ORCID: 0000-0002-1284-082x

Institute of Biology of Komi Science Centre of the

Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,

28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

e-mail: vik.startsev@gmail.com

The cutting industry is one of the factors that makes a significant contribution to the disruption of forest ecosystems. The aim of the work is to study the hydrophilic and hydrophobic components of organic matter in soils after cutting. The paper presents data on amphiphilicity of organic matter of podzolic soils (Retisols) after clear-cutting with the use of multi-operational harvester/forwarder complexes. The study was conducted on different technological elements of clearcutting: apiary plot and drags (3P – three passes of harvesting equipment, 10P – ten passes, 10R – followed by leveling). Hydrophobic interaction chromatography was used to study the amphiphilic properties of soil organic matter (SOM). It was found that for all sites there is a high content of hydrophilic fractions characterized by high migration and reactivity, both in litter and mineral horizons. Their share increases in the process of reforestation. There is an accumulation of hydrophobic lignin-containing fractions formed as a result of decomposition of plant residues in the soils of windrows. It was found that hydrophobic fractions consisting of lignin-containing compounds have a high degree of correlation with total soil carbon ($r = 0.69-0.77, p < 0.05$), total nitrogen ($r = 0.66-0.79, p < 0.05$) and water-soluble carbon fraction ($r = 0.45-0.74, p < 0.05$). It is shown that organic matter reacts sensitively to anthropogenic load at the level of amphiphilic fractions content, as it significantly differs from the initial indicators after clear-cutting. The accumulation of hydrophobic lignin-containing fractions, formed as a result of decomposition of plant residues, occurs in the soils of windrows as a result of mechanical mixing of the upper mineral horizons with the litter as a result of the passage of heavy wheeled machinery.

Keywords: continuous cutting, hydrophobic interaction chromatography, Retisols.

Лесозаготовительная промышленность является одним из факторов, который вносит весомый вклад в нарушение лесных экосистем [1–4]. Для Республики Коми (РК) перво-степенное значение имеют лесные почвы, поскольку более 75 % площади региона относится к землям лесного фонда [5]. В результате проведения рубок происходит существенное нарушение почвенного и растительного покрова, что сказывается на процессах последующего восстановления растительности [6, 7]. Изменение качественного и количественного составов опада приводит к трансформации почвенного органического вещества (ПОВ). Процессы трансформации ПОВ в почвах при естественном возобновлении растительности на вырубках исследованы незначительно [3], в связи с чем необходимы знания об особенностях строения и свойствах ПОВ для оценки возможного изменения при антропогенном воздействии.

Одной из существенных характеристик ПОВ является способность проявлять гидрофобные и гидрофильные свойства. Амфифильные свойства являются важной характеристикой ПОВ, они обуславливают способность органических соединений мигрировать в водных потоках или же аккумулироваться в месте своего образования [8–11]. Кроме этого, щёлочерастворимые органические соединения могут реагировать на динамику внешних факторов и являться индикатором качества почв [12, 13].

Целью работы является изучение изменений амфифильных свойств органического вещества почв в процессе естественного лесовозобновления в первые годы после рубки хвойно-лиственного древостоя.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования были выбраны подзолистые почвы, формирующиеся в средней тайге европейского северо-востока России (Сыктывдинский район, РК). Объект исследования был подробно описан в работе [14]. Была исследована типичная подзолистая почва под исходным лиственно-хвойным насаждением (ИЛ), который в дальнейшем (зима 2020 г.) был вырублен. Спустя три года после рубки (лето 2023 г.) были исследованы почвы на пасечном участке (П), на участке волока с тремя проходами форвардера (ЗП), участке волока с десятью проходами (10П) и участке волока с десятью проходами и с последующим выравниванием (10Р). Анализировали подстилку и верхние минеральные

горизонты. Подстилку делили на несколько подгоризонтов по степени разложения растительных остатков согласно [15, 16].

Для изучения амфифильных компонентов ПОВ использовали жидкостную хроматографию гидрофобного взаимодействия (ЖХГВ). Хроматографическое фракционирование проводили на колонке 1×10 см с гидрофобизированным гелем агарозы (Octyl Sepharose CL-4B, Pharmacia) на хроматографе BioLogic LP (BioRad, USA). Оптическую плотность элюата измеряли при $\lambda = 280$ нм. Анализировали щёлочные экстракты (0,1 н NaOH) в соотношении почва:раствор (1:10), время хроматографирования 85 мин. От минеральных примесей экстракт и растворённые препараты очищали центрифугированием (10000 об./мин, в течение 20 мин). Гидрофильные компоненты первой фракции не взаимодействуют с хроматографической матрицей и элюируются первыми при взаимодействии со стартовым буфером (А) – 0,05 моль/дм³ Трис-НСl⁺² моль/дм³ (NH₄)₂SO₄, рН 8,0. Элюирование органических компонентов, сорбированных на матрице геля, осуществляли путём постепенного ослабления их гидрофобных контактов с матрицей геля: сначала 0,05 моль/дм³ Трис-НСl (буфер В, рН 8,0) при негативном градиенте буфера А (вторая фракция), третью фракцию отделяли 100 %-ным буфером В. При возрастающей концентрации додецилсульфата натрия (0,05 моль/дм³ Трис-НСl+0,25 % SDS, буфер С, рН 8,0) элюировали четвёртую фракцию. Последнюю фракцию десорбировали раствором 5 ммоль/дм³ ЭТДА+0,2 н NaOH (буфер D). Особенности используемого метода подробно описаны ранее [8]. Относительное содержание амфифильных фракций определяли по площади каждой хроматографической фракции, выраженной в процентах от общей площади хроматографических пиков, с помощью программы обработки данных МультиХром (Амперсенд, Россия). Степень гидрофильности (D_H) определяли как отношение суммы площадей гидрофильных к сумме площадей гидрофобных компонентов.

Компоненты органического вещества, входящие в первые две хроматографические фракции, отнесены к гидрофильным; в составе третьей, четвёртой и пятой хроматографических фракций – к гидрофобным. Гидрофильные фракции представлены низкомолекулярными, насыщенными азотом алифатическими соединениями, третья и четвёртая фракции представлены высокомолекулярными органическими соединениями ароматической природы. В

четвёртой фракции преимущественно присутствуют лигниноподобные соединения. Пятая фракция представлена компонентами, связанными с железом и алюминием. Гидрофильные органические соединения преимущественно представлены миграционно-способными соединениями, которые хорошо растворяются в водных растворах и включают в себя основной запас легкодоступных питательных веществ. Гидрофобные фракции (третья-пятая) представлены биополимерами различной степени разложения и обладают возможностями закрепления на минеральной матрице почв.

Построение графиков и таблиц осуществляли с использованием Microsoft Excel 2010

(Microsoft, США). Рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона (r) и построены корреляционные матрицы в программе STATISTICA 10 (Stat. Soft Inc., Tulsa, OK, США). Различия считались значимыми при уровне значимости $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Работа представляет собой часть большого исследования по оценке влияния тяжёлой лесозаготовительной деятельности на почвы и ПОВ. Детально с описанием эксперимента и первыми опубликованными результатами можно ознакомиться в работах [14, 17–20].

Таблица 1 / Table 1

Доля амфифильных фракций и степень гидрофильности (D_H) в составе почвенного органического вещества (ПОВ) / Proportion of amphiphilic fractions and hydrophilicity degree (D_H) in soil organic matter (SOM) composition

Участок Site	Год Year	Горизонт Horizon	Глубина, см Depth, cm	Номер хроматографической фракции Chromatographic fraction number					D_H
				1	2	3	4	5	
ИЛ OF	2020	O(L)	0–1	41,9 ± 3,0	18,7 ± 1,2	13,1 ± 0,9	21,2 ± 1,4	5,1 ± 0,3	1,5
		O(F)	1–4	37,2 ± 2,5	18,8 ± 1,3	11,1 ± 0,7	28,2 ± 1,9	4,7 ± 0,3	1,3
		O(H)	4–5	37,9 ± 3,0	26,2 ± 1,7	17,1 ± 1,1	17,0 ± 1,1	1,70 ± 0,11	1,8
		EL1	5–20	7,3 ± 0,5	21,4 ± 1,4	15,6 ± 1,0	12,6 ± 0,8	43,1 ± 2,9	0,4
		EL2	20–45	32,8 ± 2,2	2,0 ± 1,4	1,5 ± 0,1	3,8 ± 0,3	60 ± 4	0,5
П UDFA	2023	O(L)	0–4	51,8 ± 3,0	12,1 ± 0,8	9,9 ± 0,7	24,2 ± 1,6	2,00 ± 0,13	1,8
		O(F)	4–7	48,4 ± 3,0	17,6 ± 1,2	9,0 ± 0,6	22,8 ± 1,5	2,30 ± 0,15	1,9
		O(H)	7–10	52,2 ± 3,0	19,2 ± 1,3	13,3 ± 0,9	13,8 ± 0,9	1,50 ± 0,10	2,5
		EL1	10–13(14)	59 ± 4	15,6 ± 1,0	–	14,0 ± 0,9	11,2 ± 0,7	3,0
		EL2	13(14)–33	50,7 ± 3,0	23,4 ± 1,6	–	3,80 ± 0,30	22,1 ± 1,5	2,9
ЗП ЗР	2021	O(L)	0–2	32,9 ± 2,2	16,9 ± 1,1	12,9 ± 0,9	33,1 ± 2,2	4,20 ± 0,30	1,0
		O(F+H)	2–5	24,8 ± 1,6	23,8 ± 1,6	25,2 ± 1,7	22,7 ± 1,5	3,70 ± 0,30	0,9
		EL1	5–15	44,2 ± 3,0	23,0 ± 1,5	0,2000 ± 0,0010	6,5 ± 0,4	26,1 ± 1,7	2,0
		EL2	15–25	10,0 ± 0,7	25,1 ± 1,7	–	3,42 ± 0,23	62 ± 4	0,5
	2023	O(L)	0–3	36,0 ± 2,4	14,2 ± 0,9	8,7 ± 0,6	39,0 ± 2,6	2,04 ± 0,14	1,0
		O(F+H)	3–10	33,3 ± 2,2	16,8 ± 1,1	21,3 ± 1,4	26,6 ± 1,8	1,92 ± 0,13	1,0
		EL1	10–15	46,5 ± 3,0	14,5 ± 1,0	0,2000 ± 0,0010	7,3 ± 0,5	31,6 ± 2,1	1,6
EL2	15–40	26,8 ± 1,8	31,5 ± 2,1	–	15,5 ± 1,0	26,2 ± 1,7	1,4		
10П 10Р	2021	TUR	0–15	39,3 ± 3,0	16,3 ± 1,1	5,0 ± 0,3	0,60 ± 0,04	38,8 ± 3,0	1,3
		EL	15–20	35,7 ± 2,4	15,5 ± 1,0	–	18,4 ± 1,2	30,3 ± 2,0	1,1
	2023	O(L)	0–1	45,8 ± 3,0	12,8 ± 0,9	20,5 ± 1,4	18,5 ± 1,2	2,45 ± 0,16	1,4
		TUR	1–15	43,5 ± 3,0	10,1 ± 0,7	20,3 ± 1,4	22,7 ± 1,5	3,40 ± 0,23	1,2
		EL	15–20	42,0 ± 3,0	6,0 ± 0,4	–	6,0 ± 0,4	12,9 ± 0,9	2,2
10Р 10R	2021	TUR	0–10	27,1 ± 1,8	51,4 ± 3,0	–	8,1 ± 0,5	13,5 ± 0,9	3,6
		BEL	10–20	26,0 ± 1,7	56 ± 4	–	4,30 ± 0,30	14,1 ± 0,9	4,4
	2023	TUR	0–20	58 ± 4	21,7 ± 1,4	–	8,3 ± 0,6	12,0 ± 0,8	3,9
		BEL	20–60	17,6 ± 1,1	–	–	43,9 ± 3,0	38,6 ± 3,0	0,3

Примечание: ИЛ – исходный лес, П – пасечный участок, ЗП – участок волока с тремя проходами форвардера, 10П – участок волока с десятью проходами, 10Р – участок волока с десятью проходами и с последующим выравниванием, прочерк – не обнаружено, $n = 3$. / Note: OF – original forest, UDFA – undisturbed felling area, ЗР – skidding trail after three forwarder passes, 10Р – skidding trail after ten forwarder passes, 10R – skidding trail after ten forwarder passes and surface leveling (reclamation). Dash – not detected. $n = 3$.

Анализ гидрофобно-гидрофильного состава щёлочерастворимого органического вещества почв исследуемых участков позволил оценить поведение ПОВ в процессе лесовозобновления после проведения рубок. Установлено, что для всех участков наблюдается высокое содержание гидрофильных фракций, как в подстилке, так и в минеральных горизонтах (табл. 1). Наибольшее содержание пятой хроматографической фракции характерно для минеральных горизонтов. Доля амфифильных компонентов в составе ПОВ представлена в таблице 1. В составе гидрофильных компонентов преобладает первая фракция (до 59 %). Это согласуется с проведёнными ранее исследованиями для почв РК [11, 21].

Отмечено, что после рубки происходит перераспределение гидрофильно-гидрофобных компонентов органического вещества в почвах. После рубки в почве пасечного участка наблюдалось увеличение гидрофильных фракций в органогенном горизонте по сравнению

с исходными значениями и уменьшение доли гидрофобных компонентов (рис.).

В минеральных горизонтах пасечного участка спустя три года после рубки выявлено двукратное увеличение доли первой и второй фракций (75 %) по сравнению с участком до рубки (32 %). Это, вероятно, связано с дополнительным поступлением органики с порубочными остатками и трансформацией свежего опада. Важным отличием участка пасеки от исходного леса является отсутствие третьей гидрофобной фракции в минеральных горизонтах и уменьшение доли соединений пятой фракции, связанной с железом и алюминием.

Для почвы участка с тремя проходами колёсной техники (ЗП) установлено уменьшение доли гидрофильных фракций в подстилке (49–50 %) и увеличение гидрофобных компонентов в основном за счёт фракций (третьей и четвёртой), образующихся в результате разложения растительных остатков (целлюлоза, гемицеллюлоза, лигнин). Данная особен-

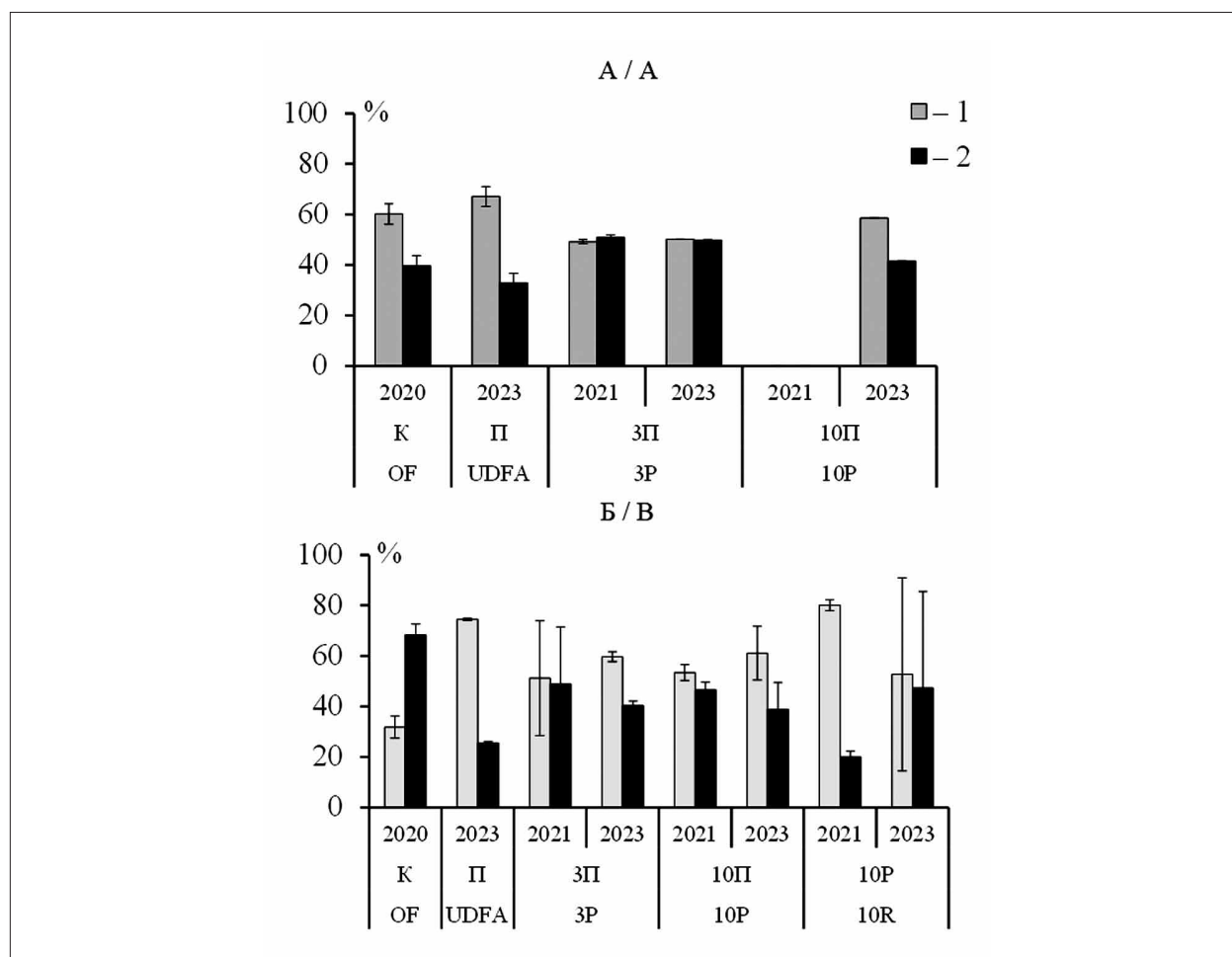


Рис. Содержание (%) амфифильных фракций в подстилках (А) и минеральных горизонтах (Б). 1 – гидрофильные фракции, 2 – гидрофобные фракции. Обозначения как в таблице 1
Fig. Content (%) of amphiphilic fractions in bedding (A) and mineral horizons (B). 1 – hydrophilic fractions, 2 – hydrophobic fractions. Designations as in Table 1

Таблица 2 / Table 2

Коэффициенты корреляции Пирсона (r) амфифильных фракций ПОВ с содержанием углерода и азота (по данным работ [14, 17]) / Pearson correlation coefficients (r) of amphiphilic fractions with carbon and nitrogen content (according to [14, 17])

Параметр / Parameter		$C_{\text{общ}} / C_{\text{tot}}$	$N_{\text{общ}} / N_{\text{tot}}$	$C_{\text{вс}} / TC$	$N_{\text{вс}} / TN$
Номер хроматографической фракции Chromatographic fraction number	1	0,18	0,17	0,22	-0,32
	2	-0,20	-0,20	-0,24	-0,01
	3	0,69*	0,66*	0,45*	-0,26
	4	0,77*	0,79*	0,73*	-0,14
	5	-0,70*	-0,68*	-0,57*	0,41*
Степень гидрофильности Hydrophilicity degree	D_{H}	-0,21	-0,21	-0,18	-0,25

Примечание: $C_{\text{общ}}$ – общий углерод почвы, $C_{\text{вс}}$ – водорастворимая фракция углерода, $N_{\text{общ}}$ – общий азот почвы, $N_{\text{вс}}$ – водорастворимая фракция азота. * – значимые величины, $p < 0,05$, $n = 27$.

Note: C_{tot} – total soil carbon, TC – water-soluble carbon fraction, N_{tot} – total soil nitrogen, TN – water-soluble nitrogen fraction. * – significant values, $p < 0.05$, $n = 27$.

ность обусловлена разложением порубочных остатков на волокнах, поскольку органическое вещество древесных остатков богато лигнином и лигниноподобными веществами [22]. Аналогичные закономерности для почвы с тремя проходами форвардера наблюдаются и спустя три года после рубки.

Для почв с десятью проходами колёсной техники характерны наибольшие изменения морфологических свойств верхней части почвенного профиля, обусловленные перемешиванием (турбированием) минеральных горизонтов с подстилкой. Для почвы 10Р также дополнительно было проведено разравнивание колеи, были убраны все порубочные остатки и подстилочный горизонт. Показано, что в первый год после рубки для почвы 10П в минеральных горизонтах содержание гидрофильных фракций составляло 53 %, что близко к показателям почвы 3П, но ниже, чем в исходном лесу. Также отмечено уменьшение целлюлозоподобных и лигнинсодержащих фракций ПОВ, в основном за счёт третьей фракции (6–18 %). Гидрофобные соединения, входящие в состав этих хроматографических фракций, преимущественно сосредоточены в подстилках, что связано с их малой подвижностью и аккумуляцией непосредственно в месте образования. На третий год после рубки наблюдается незначительное увеличение их содержания, что связано с поступлением свежего растительного опада. Спустя три года начинает формироваться органогенный горизонт O(L), в котором увеличивается доля третьей и четвёртой фракций до 39 %. В турбированном горизонте почвы 10П выявлено уменьшение доли фракции, связанной с железом и алюминием, спустя три года после рубки до 3,4–21 %, что значительно ниже, чем в почве ИЛ. Вероятно,

это связано с началом разложения и минерализации погребённой органики из подстилки и порубочных остатков, что приводит к увеличению фракций (третьей и четвёртой), приуроченных к продуктам гумификации органического материала *in situ* [8]. Увеличение доли гидрофобных соединений в почвах волоков может быть связано с переувлажнением почв на первых стадиях послерубочной сукцессии и с миграцией низкомолекулярных соединений, а также с увеличением содержания доступных для связывания ионов железа и алюминия. К третьему году после рубки наблюдается снижение доли 5-й фракции, что может быть вызвано активной миграцией гидрофобных соединений по почвенному профилю. На участках, подвергшихся механическому нарушению, наблюдается тенденция уменьшения содержания третьей фракции ПОВ, по сравнению с исходным лесом. Это в значительной степени определяется изменением качественного и количественного состава растительного опада в ходе послерубочного лесовозобновления, что является важной отличительной особенностью почв после рубки.

Анализ корреляционных связей (табл. 2) позволил установить, что гидрофобные фракции (3 и 4), представленные ароматическими и лигнинсодержащими соединениями, обладают высокой степенью корреляции с общим углеродом почвы $C_{\text{общ}}$ ($r = 0,69–0,77$, $p < 0,05$), общим азотом $N_{\text{общ}}$ ($r = 0,66–0,79$, $p < 0,05$) и водорастворимой фракцией углерода $C_{\text{вс}}$ ($r = 0,45–0,74$, $p < 0,05$). Напротив, пятая гидрофобная фракция, связанная с ионами металлов, имеет отрицательную корреляцию с содержанием углерода – $C_{\text{вс}}$ ($r = -0,57$, $p < 0,05$), общим $C_{\text{общ}}$ ($r = -0,57$, $p < 0,05$). Значимых корреляцион-

ных зависимостей для гидрофильных фракций не выявлено.

Показатель гидрофильности (D_H) также существенно различается для почв разных технологических элементов вырубки до и после рубки. Для почвы исходного леса показатель варьирует в диапазоне 0,4–1,8. В минеральных горизонтах D_H был равен 0,4–0,5, в подстилке – 1,3–1,8. Это соотносится с ранее полученными данными для почв региона исследований [21]. После рубки в почве пасечного участка выявлено увеличение показателя гидрофильности до 1,8–3,0, что свидетельствует о преобладании в составе органического вещества гидрофильных фракций. В почве с тремя проходами колёсной техники степень гидрофильности составляла 0,5–2,0 в минеральных горизонтах спустя год после рубки, в подстилке 0,9–1,0. Спустя три года после рубки для почвы ЗП показатель D_H оставался достаточно стабилен – 1,0–1,6. В подстилке почвы 10П на третий год после рубки степень гидрофильности была близка к показателю исходного участка (1,4). В целом для почвы с десятью проходами форвардера D_H варьировал от 1,1 до 1,4. Наибольшие изменения состава амфифильных фракций по степени гидрофильности выявлены для почвы с выравниваем 10Р. Выявлено значительное возрастание гидрофильных компонентов в составе ПОВ от 3,6–4,4 в первый год после рубки до 0,3–3,9 на третий. Также происходит увеличение доли пятой фракции в нижнем минеральном горизонте спустя три года после рубки. Это можно объяснить развитием процессов оглеения, в результате которых происходит накопление соединений железа и алюминия, способных к реакциям комплексообразования [23].

Таким образом, установлено, что компоненты растительности, порубочных остатков, древесного опада, являющиеся прекурсорами ПОВ, обуславливают различия гидрофильно-гидрофобных свойств почв [24–26]. Показано, что органическое вещество чутко реагирует на антропогенную нагрузку на уровне амфифильных фракций ПОВ, поскольку их содержание существенно различается от исходных показателей после сплошнорубочной рубки.

Заключение

Проведённое исследование показало, что основную долю щёлочерастворимого органического вещества в почвах составляют гидро-

фильные фракции, отличающиеся высокой миграционной и реакционной способностью. Установлено, что их доля увеличивается в процессе лесовозобновления после рубки, как в подстилках, так и минеральных горизонтах почв, что отчётливо прослеживается по показателю степени гидрофильности. Кроме этого происходит накопление гидрофобных лигнинсодержащих фракций, образующихся в результате разложения растительных остатков, в почвах волоков вследствие механического перемешивания верхних минеральных горизонтов с подстилкой после прохождения тяжёлой колёсной техникой. Вероятно, амфифильные компоненты ПОВ можно использовать для мониторинга антропогенных изменений почв в результате сплошнорубочных рубок.

Работа выполнена в рамках ГБ темы «Почвы и почвенные ресурсы европейского Северо-Востока России в условиях современных климатических изменений, антропогенного пресса и социально-экономических вызовов» (№ 125021902454-1).

Авторы выражают благодарность Броваевой Д.А. за помощь в проведении химического анализа.

Литература

1. Крышень А.М. Растительные сообщества вырубок Карелии. М.: Наука, 2006. 262 с.
2. Лукина Н.В., Полянская Л.М., Орлова М.А. Питательный режим почв северотаежных лесов. М.: Наука, 2008. 341 с.
3. Дымов А.А. Влияние сплошных рубок в бореальных лесах России на почвы (обзор) // Почвоведение. 2017. № 7. С. 787–798. doi: 10.7868/S0032180X17070024
4. Долгая В.А., Бахмет О.Н. Свойства лесных подстилок на ранних этапах естественного лесовозобновления после сплошных рубок в средней тайге Карелии // Лесоведение. 2021. № 1. С. 65–77. doi: 10.31857/S0024114821010022
5. Карпачевский Л.О. Динамика свойств почвы. М.: ГЕОС, 1997. 170 с.
6. Kuuluvainen T., Gauthier S. Young and old forest in the boreal: critical stages of ecosystem dynamics and management under global change // For. Ecosyst. 2018. V. 5. Article No. 26. doi: 10.1186/s40663-018-0142-2
7. Дымов А.А. Сукцессии почв в бореальных лесах Республики Коми. М.: ГЕОС, 2020. 336 с. doi: 10.34756/GEOS.2020.10.37828
8. Милановский Е.Ю. Гумусовые вещества почв как природные гидрофобно-гидрофильные соединения. М.: ГЕОС, 2009. 185 с.

9. Умарова А.Б. Преимущественные потоки влаги в почвах: закономерности формирования и значение в функционировании почв. М.: ГЕОС, 2011. 265 с.
10. Дымов А.А., Милановский Е.Ю. Изменение органического вещества таежных почв в процессе естественного лесовозобновления растительности после рубок (средняя тайга Республики Коми) // Почвоведение. 2014. № 1. С. 39–47. doi: 10.7868/S0032180X14010043
11. Старцев В.В., Дымов А.А. Амфифильные свойства и водорастворимые компоненты органического вещества почв Приполярного Урала // Почвоведение. 2021. № 12. С. 1492–1505. doi: 10.31857/S0032180X21120121
12. Чупрова В.В., Люкшина И.В., Белоусов А.А., Швабенланд И.С. Запасы и динамика легкоминерализуемой фракции органического вещества в почвах Средней Сибири // Вестник КрасГАУ. 2003. Вып. 3. С. 65–74.
13. Власенко О.А. Динамика углерода подвижного гумуса в агрочерноземе при возделывании яровой пшеницы с помощью ресурсосберегающих технологий // Вестник КрасГАУ. 2015. № 9. С. 60–66.
14. Дымов А.А., Старцев В.В., Горбач Н.М., Севергина Д.А., Кутявин И.Н., Осипов А.Ф., Дубровский Ю.А. Изменения почв и растительности при разном числе проездов колесной лесозаготовительной техники (средняя тайга, Республика Коми) // Почвоведение. 2022. № 11. С. 1426–1441. doi: 10.31857/S0032180X22110028
15. Богатырев Л.Г. Образование подстилок – один из важнейших процессов в лесных экосистемах // Почвоведение. 1996. № 4. С. 501–511.
16. 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.
17. Startsev V.V., Severgina D.A., Dymov A.A. Dynamics of water-soluble carbon and nitrogen content in soils in the first years after clearcutting // Eurasian Soil Sc. 2024. V. 57. No. 6. P. 903–916. doi: 10.1134/S1064229324600064
18. Ogorodniaia S.A., Butylkina M.A., Krasikov S.R., Dymov A.A. Physical properties upper mineral soil horizons in a cutover area of the middle boreal forest in the Komi Republic // Moscow Univ. Soil Sci. Bull. 2024. V. 79. No. 2. P. 91–100. doi: 10.3103/S0147687424700108
19. Osipov A.F., Startsev V.V., Dymov A.A. Influence of clear felling on CO₂ emission from surface of podzolic soil of coniferous–deciduous forest (Middle Taiga, Komi Republic) // Eurasian Soil Sc. 2024. V. 57. No. 5. P. 806–813. doi: 10.1134/S1064229323603700
20. Кутявин И.Н., Манов А.В., Старцев В.В., Дымов А.А. Влияние лесозаготовительной техники на динамику естественного возобновления леса после рубки хвойно-лиственного насаждения средней тайги // Теоретическая и прикладная экология. 2024. № 3. С. 123–132. doi: 10.25750/1995-4301-2024-3-123-132
21. Дымов А.А., Низовцев Н.А. Амфифильные свойства почвенного органического вещества преобладающих хвойных деревьев средней тайги // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 1. С. 62–68. doi: 10.25750/1995-4301-2015-1-061-068
22. Карманов А.П., Кочева Л.С. Целлюлоза и лигнин – свойства и применение. Сыктывкар: Коми науч. центр УрО Российской АН, 2006. 246 с.
23. Зайдельман Ф.Р. Процесс глееобразования и его роль в формировании почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 316 с.
24. Kovaleva N.O., Kovalev I.V. Transformation of lignin in surface and buried soils of mountainous landscapes // Eurasian Soil Sc. 2009. V. 42. No. 11. P. 1270–1281. doi: 10.1134/S1064229309110106
25. Ведрова Э.Ф., Решетникова Т.В. Масса подстилки и интенсивность её разложения в 40-летних культурах основных лесобразующих пород Сибири // Лесоведение. 2014. № 1. С. 42–50.
26. Vesterdal L., Schmidt I.K., Callesen I., Nilsson L.O., Gundersen P. Carbon and nitrogen floor and mineral soil under six common European tree species // Forest Ecology and Management. 2008. V. 255. P. 35–48. doi: 10.1016/j.foreco.2007.08.015

References

1. Kryshen A.M. Plant communities of clearcuts in Karelia. Moscow: Nauka, 2006. 262 p. (in Russian).
2. Lukina N.V., Polyanskaya L.M., Orlova M.A. Nutrient regime of soils of northern taiga forests. Moskva: Nauka, 2008. 341 p. (in Russian).
3. Dymov A.A. The impact of clearcutting in boreal forests of Russia on soils: a review // Pochvovedenie. 2017. No. 7. P. 787–798 (in Russian). doi: 10.7868/S0032180X17070024
4. Dolgaya V.A., Bakhmet O.N. Forest litter layer properties on the early stages of natural regrowth after clear cuts in Karelian middle taiga // Lesovedenie. 2021. No. 1. P. 65–77 (in Russian). doi: 10.31857/S0024114821010022
5. Karpachevsky L.O. Dynamics of soil properties. Moskva: GEOS, 1997. 170 p. (in Russian).
6. Kuuluvainen T., Gauthier S. Young and old forest in the boreal: critical stages of ecosystem dynamics and management under global change // For. Ecosyst. 2018. V. 5. Article No. 26. doi: 10.1186/s40663-018-0142-2
7. Dymov A.A. Soil successions at boreal forests of the Komi Republic. Moskva: GEOS, 2020. 336 p. (in Russian). doi: 10.34756/GEOS.2020.10.37828
8. Milanovsky E.Yu. Humic substances of soils as natural hydrophobic-hydrophilic compounds. Moskva: GEOS, 2009. 185 p. (in Russian).
9. Umarova A.B. Predominant moisture flows in soils: regularities of formation and importance in soil functioning. Moskva: GEOS, 2011. 265 p. (in Russian).
10. Dymov A.A., Milanovsky E.Yu. Changes in organic matter of taiga soils in the process of natural reforestation of

vegetation after logging (middle taiga of the Komi Republic) // *Pochvovedenie*. 2014. No. 1. P. 39–47 (in Russian). doi: 10.7868/S0032180X14010043

11. Startsev V.V., Dymov A.A. Amphiphilic properties and water-soluble organic matter of the soils of the Subpolar Urals // *Pochvovedenie*. 2021. No. 12. P. 1492–1505 (in Russian). doi: 10.31857/S0032180X21120121

12. Chuprova V.V., Lukshina I.V., Belousov A.A., Shvabenland I.S. Stocks and dynamics of easily mineralizable fraction of organic matter in the soils of Central Siberia // *Vestn. KrasGAU*. 2003. No. 3. P. 65–74 (in Russian).

13. Vlasenko O.A. The dynamics of mobile humus carbon in agrochernozem in the spring wheat cultivation with the use of resource-saving technologies // *Vestn. KrasGAU*. 2015. No. 9. P. 60–66 (in Russian).

14. Dymov A.A., Startsev V.V., Gorbach N.M., Severgina D.A., Kutuyavin I.N., Osipov A.F., Dubrovsky Y.A. Changes in soil and vegetation with different number of passes of wheeled forestry equipment (Middle Taiga, Komi Republic) // *Pochvovedenie*. 2022. No. 11. P. 1426–1441 (in Russian). doi: 10.31857/S0032180X22110028

15. Bogatyrev L.G. Formation of forest litter as one of the major processes in forest ecosystems // *Pochvovedenie*. 1996. No. 4. P. 501–511 (in Russian).

16. Bogatyrev L.G., Demin V.V., Matyshak G.V., Sapozhnikova V.A. On some theoretical aspects of studying forest litters // *Lesovedeniye*. 2004. No. 4. P. 17–29 (in Russian).

17. Startsev V.V., Severgina D.A., Dymov A.A. Dynamics of water-soluble carbon and nitrogen content in soils in the first years after clearcutting // *Eurasian Soil Sc.* 2024. V. 57. No. 6. P. 903–916. doi: 10.1134/S1064229324600064

18. Ogorodniaia S.A., Butylkina M.A., Krasikov S.R., Dymov A.A. Physical properties of upper mineral soil horizons in a cutover area of the middle boreal forest in

the Komi Republic // *Moscow Univ. Soil Sci. Bull.* 2024. V. 79. No. 2. P. 91–100. doi: 10.3103/S0147687424700108

19. Osipov A.F., Startsev V.V., Dymov A.A. Influence of clear felling on CO₂ emission from surface of podzolic soil of coniferous–deciduous forest (Middle Taiga, Komi Republic) // *Eurasian Soil Sc.* 2024. V. 57. No. 5. P. 806–813. doi: 10.1134/S1064229323603700

20. Kutuyavin I.N., Manov A.V., Startsev V.V., Dymov A.A. The logging equipment effect on the dynamics of natural reforestation of after cutting mixed coniferous-deciduous stand in the middle taiga // *Theoretical and Applied Ecology*. 2024. No. 3. P. 123–132 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-3-123-132

21. Dymov A.A., Nizovtsev N.A. Amphiphilic properties of soil organic matter of predominant coniferous trees of the middle taiga // *Theoretical and Applied Ecology*. 2015. No. 1. P. 62–68 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2015-1-061-068

22. Karmanov A.P., Kocheva L.S. Cellulose and lignin – properties and application. Syktyvkar: Komi nauch. tsentr UrO Rossiyskoy AN, 2006. 246 p. (in Russian).

23. Zaidelman F.R. Gleyzation and its role in soil formation. Moskva: Moscow University Press, 1998. 316 p. (in Russian).

24. Kovaleva N.O., Kovalev I.V. Transformation of lignin in surface and buried soils of mountainous landscapes // *Eurasian Soil Sc.* 2009. V. 42. No. 11. P. 1270–1281. doi: 10.1134/S1064229309110106

25. Vedrova E.F., Reshetnikova T.V. Litter mass and intensity of litter decomposition in 40-year old plantations of the main forest forming species of Siberia // *Lesovedenie*. 2014. No. 1. P. 42–50 (in Russian).

26. Vesterdal L., Schmidt I.K., Callesen I., Nilsson L.O., Gundersen P. Carbon and nitrogen floor and mineral soil under six common European tree species // *Forest Ecology and Management*. 2008. V. 255. P. 35–48. doi: 10.1016/j.foreco.2007.08.015