

Р. С. Василевич, Е. Д. Лодыгин, В. А. Безноси́ков

МОЛЕКУЛЯРНО-МАССОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГУМУСОВЫХ ВЕЩЕСТВ ТУНДРОВЫХ ПОЧВ ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ*

Установлено, что гуминовые кислоты тундровых почв содержат три фракции разной молекулярной массы: ≥ 600 , 62–83 и 2,6–5,3 кДа соответственно; фульвокислоты — одну фракцию — 1,5–4,4 кДа. Содержание низкомолекулярной фракции ГК значительно превышает долю средне- и высокомолекулярной фракций. Освоение тундровых поверхностно-глеевых почв приводит к уменьшению доли высокомолекулярной и увеличению доли низкомолекулярной фракции ГК. Установлены корреляционные зависимости между содержанием молекулярных фракций и параметрами ГК. Библиогр. 16 назв. Ил. 1. Табл. 3.

Ключевые слова: тундровые почвы, гуминовые кислоты, фульвокислоты, молекулярно-массовое распределение.

R. S. Vasilevich, E. D. Lodygin, V. A. Beznosikov

MOLECULAR-MASS DISTRIBUTION OF TUNDRA SOILS HUMIC SUBSTANCES FROM THE EUROPEAN NORTHEAST OF RUSSIA

Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Division RAS, 28, ul. Kommunisticheskaya, Syktyvkar, 167982, Russian Federation; vasilevich.r.s@ib.komisc.ru, lodigin@ib.komisc.ru, soil@ib.komisc.ru

It is established that the humic acids (HA) of tundra soils contain three fractions with a different molecular weight: ≥ 600 , 62–83 and 2,6–5,3 kDa; fulvic acids (FA) — one fraction — 1,5–4,4 kDa. The maintenance of a low molecular weight fraction of HA considerably exceeds a share of medium and high molecular weight fractions. Reclamation of tundra surface-gley soils leads to decrease of a share of high molecular weight and to increase of a share of low molecular weight fraction as a part of HA. Correlative dependences between the contents of HA molecular weight fractions with parameters of HA are established. Refs 16. Figs 1. Tables 3.

Keywords: tundra soils, humic acids, fulvic acids, molecular-mass distribution.

Введение

Гуминовые (ГК) и фульвокислоты (ФК) представляют собой полидисперсные смеси сложных по структуре высокомолекулярных веществ, поэтому их фракционирование — одна из главных проблем химии гумуса. Изучение фракционного состава ГК и ФК необходимо для выяснения их роли в процессах почвообразования, в частности для раскрытия механизмов взаимодействия гумусовых веществ (ГВ) с минеральными соединениями и для регулирования агрегатного состава почв. В исследованиях такого рода предпочтение отдается мягким приемам анализа гуминового материала, в частности методу гель-хроматографии [1–3].

Существуют две основные концепции гумификации органического вещества почв. Исходя из первой, при трансформации органических остатков в гумусовые вещества происходит формирование наиболее устойчивых групп природных сое-

Р. С. Василевич (vasilevich.r.s@ib.komisc.ru), Е. Д. Лодыгин (lodigin@ib.komisc.ru), В. А. Безноси́ков (soil@ib.komisc.ru): Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, Российская Федерация, 167982, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28.

* Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 13-04-00070-а, 14-04-31303-мол-а и Программы Президиума РАН № 15-2-4-5.

динений. Термодинамический отбор в процессе гумификации приводит к увеличению доли ароматических фрагментов и уменьшению длины алифатических цепей, что сопровождается увеличением молекулярной массы ГВ. Низкомолекулярная фракция обогащена алифатическими цепочками, углеводными и аминокислотными группами [4]. Согласно второй концепции, высокие молекулярные массы ГВ обусловлены образованием ассоциированных или агрегатированных коллоидных систем [5]. На основании данных структурно-функциональных параметров гуминовых кислот было обнаружено, что с уменьшением молекулярной массы (M_r) значительно повышается (более чем в 5 раз) ароматичность ГК чернозема. В высокомолекулярной фракции доминируют группы алкильного углерода, углеводов, метоксидов, аминокислот и ацеталей [2]. Эти результаты согласуются с данными ИК-спектроскопии, показавшей наличие лабильных фрагментов преимущественно в высокомолекулярной фракции, а также уменьшение доли гидролизуемых аминокислот во фракциях с меньшими M_r [6, 7].

Цель работы — изучение влияния гидроморфизма почв на молекулярно-масовое распределение (ММР) гумусовых веществ и оценка взаимосвязи молекулярного состава ГВ и ММР гуминовых и фульвокислот, выделенных из целинных и освоенных тундровых почв европейского северо-востока России.

Объекты и методы

Исследования проведены в Большеземельской тундре Воркутинского района Республики Коми с распространением массивно-островной многолетней мерзлоты [8]. Зональными типами растительных сообществ в районе являются мохово-лишайниковая и кустарниковая тундры. Объекты исследований — препараты ГВ торфянисто-тундровой глеевой, торфяно-тундровой глеевой, тундровой поверхностно-глеевой и тундровой поверхностно-глеевой освоенной почв. Разрезы поверхностно-глеевых почв заложены на верхней части пологого склона водораздельного моренного увала. Растительная ассоциация для тундровой поверхностно-глеевой освоенной почвы — сеянный мятликово-лисохвостный бессменный луг (возраст более 50 лет), для тундровой поверхностно-глеевой целинной — ивняково-ерниковая моховая мелкобугорковатая тундра. В растительном покрове преобладают гипновые и политриховые мхи, карликовая береза, ивы филиколистная, серо-голубая, шерстистая, брусника, голубика. Тундровые поверхностно-глеевые освоенные почвы в осенне-зимний период промерзают сильнее по сравнению с целинными аналогами, вследствие меньшей мощности снежного покрова [9]. Разрезы гидроморфных почв расположены на средней части склона. Растительность характеризуется ерnikово-зеленомошным покровом, присутствием политриховых и сфагновых мхов, лишайников, водяники, багульника и др. Особенностью исследованных почв являются: кислая реакция среды всего профиля, высокое содержание углерода в грубогумусовых органогенных горизонтах (от 18,6% до 30,0%) и резкое его снижение вниз по профилю. Тип гумуса всех исследованных почв гуматно-фульватный в органогенных горизонтах ($C_{ГК}/C_{ФК}$ — 0,60–0,77) и фульватный ($C_{ГК}/C_{ФК}$ — 0,12–0,42) в остальной части минеральной толщи. Гидроморфные почвы характеризуются низкой степенью гумификации органического вещества ($C_{ГК}/C_{общ.}$ — 15,0–16,2%), поверхностно-глеевые — средней (21,0–23,0%). Морфо-

логическое описание и более подробное описание гумусного состояния почв опубликованы ранее [10].

Препараты ГК и ФК выделены из органогенных горизонтов тундровых почв по методике, рекомендованной Международным обществом по изучению гумусовых веществ IHSS [11]. Выделение кислот проводили из воздушно-сухих образцов почв путем 2-кратной экстракции 0,1 М NaOH, после чего к щелочному экстракту добавляли насыщенный раствор Na_2SO_4 (20% от объема экстракта) для коагуляции коллоидных частиц. Центрифугировали в течение 2 ч при 13000 об./мин. Затем серной кислотой осаждали ГК, а ФК очищали на активированном угле (марка АГ-3) и обессоливали пропусканием через катионит КУ-2 в H^+ -форме. В связи с предполагаемым близким молекулярным строением ГК исследованных почв [12] в данной работе также были изучены свойства «гидролизного образца» ГК торфянисто-тундровой глеевой почвы, полученного при длительном воздействии щелочи (две недели) при выделении препарата. Молекулярно-массовые распределения препаратов ГК и ФК получены на хроматографической системе AKTAbasic 10 UPS (Amersam Biosciences, Швеция) с использованием колонки Superdex™ 200 10/300 GL (с гелем из сшитого декстрана, диапазон фракционирования для глобулярных белков 10–600 кДа), объем аликвоты растворов ФК и ГК 0,1 см³, скорость элюирования 0,5 см³/мин., длина волны светофильтра 254 нм. Определение рабочей области геля проводили с использованием растворов голубого декстрана и бихромата калия в концентрации 1 мг/см³, градуировку колонки осуществляли по глобулярным белкам. Предварительно растворы ГК и ФК в концентрации 0,1 мг/см³ в 0,1 моль/дм³ NaOH очищали от низкомолекулярных соединений пропусканием через колонку, заполненную гелем Сефадек G-10 (сшитый декстран, диапазон фракционирования для глобулярных белков до 700 Да). В качестве элюата использовали Tris-HCl-буфер с pH 8,2 [13] с содержанием додецилсульфата натрия (0,1%) для предотвращения специфической адсорбции гумусовых веществ на геле, азидата натрия (0,02%) как антибактериального вещества и хлорида натрия (0,05 моль/дм³) для постоянной ионной силы и предотвращения эффекта сверхэксклюзии. Для обработки хроматографических данных и расчета ММР фракций препаратов ГВ использовали оригинальную программу Unicorn 5.10.

Результаты и обсуждение

Исследованные препараты ГВ тундровых почв характеризуются высоким мольным отношением $x(\text{H}) : x(\text{C})$ по данным элементного состава; низкой степенью ароматичности $\omega (\text{C}_{\text{H-аром}}) + \omega (\text{C}_{\text{O-аром}})$ и высоким содержанием углеводных, аминокислотных $\omega (\text{C}_{\text{O,N-alkyl}})$ и алкильных фрагментов $\omega (\text{C}_{\text{H-alkyl}})$ по данным ¹³C-ЯМР-спектроскопии [12]. ГВ тундровых поверхностно-глеевых освоенных почв характеризуются наименьшим мольным отношением $x(\text{C}) : x(\text{N})$ по сравнению с целинными аналогами, отражая повышенную биологическую активность почв (табл. 1).

Методом гель-хроматографии определены параметры молекулярно-массового распределения гуминовых и фульвокислот из органогенных горизонтов наиболее распространенных почв тундровой зоны северо-востока европейской части России. В гель-хроматограммах ГК были выделены три области, соответствующие трем фракциям ГК (рисунок): высокомолекулярной (область *a*), среднемолекуляр-

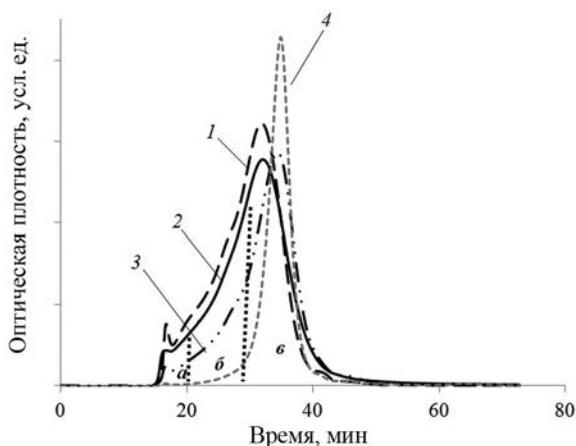
Таблица 1. Молекулярный состав гумусовых веществ тундровых почв по данным ^{13}C -ЯМР-спектроскопии [12] и элементного анализа

Горизонт	Данные ^{13}C -ЯМР-спектроскопии					Данные элементного анализа		
	Относительная доля ^{13}C , %					Мольное отношение элементов		
	ω ($\text{C}_\text{H-alkyl}$)	ω ($\text{C}_\text{O,N-alkyl}$)	ω ($\text{C}_\text{H-arom}$) + ω ($\text{C}_\text{O-arom}$)	ω (C_COOH)	ω (C_CON)	$x(\text{H}) : x(\text{C})$	$x(\text{O}) : x(\text{C})$	$x(\text{C}) : x(\text{N})$
<i>Торфяно-тундровая глеевая</i>								
О	28,3 18,1	37,4 50,3	22,3 13,9	11,9 16,9	0,2 1,5	1,25±0,12 1,52±0,15	0,54±0,03 1,33±0,05	14,8±1,1 20,7±1,5
Т	27,4 —	35,0 —	25,2 —	11,7 —	1,1 —	1,19±0,12 1,56±0,15	0,51±0,03 1,18±0,05	17,0±1,3 20,1±1,5
<i>Торфянисто-тундровая глеевая</i>								
О	24,3 13,1	34,8 57,0	28,3 17,4	11,9 11,9	1,1 0,6	1,21±0,12 1,29±0,13	0,48±0,03 0,99±0,04	15,7±1,2 41±3
О*	26,0 —	26,1 —	33,6 —	12,8 —	2,4 —	1,03±0,10 —	0,52±0,03 —	18,8±1,4 —
<i>Тундровая поверхностно-глеевая</i>								
А0	28,9 18,5	37,0 41,2	21,6 23,0	12,5 15,7	0,1 1,9	1,12±0,11 1,29±0,13	0,50±0,03 0,85±0,04	14,7±1,1 24,3±1,8
<i>Тундровая поверхностно-глеевая освоенная</i>								
Адер.	35,5 8,8	33,0 76,4	18,4 4,1	12,8 18,3	0,4 1,6	1,27±0,12 1,61±0,16	0,55±0,03 0,96±0,04	10,45±0,8 17,4±1,3

Примечания: в числителе — данные для ГК, в знаменателе — для ФК; * — данные для «гидролизного образца».

ной (область б) и низкомолекулярной (область в), ФК содержат только одну фракцию в низкомолекулярной области (в).

Распределения оптической плотности различных фракций ГВ показывают, что положения максимумов пиков практически совпадают. Области, относящиеся



Гель-хроматограммы ГК органогенных горизонтов почв:

1 — торфяно-тундровой глеевой; 2 — тундровая поверхностно-глеевой; 3 — тундровая поверхностно-глеевой освоенной; 4 — ФК тундровая поверхностно-глеевой освоенной.

к разным фракциям, имеют различные площади, что свидетельствует о вариации их относительного содержания в исследуемых образцах. Кривые молекулярно-массового распределения ГВ имеют один ярко выраженный максимум в низкомолекулярной области. Доля низкомолекулярных фракций ГК в изученных почвах доминирует (63,6–80,8%) и статистически достоверно превышает массовые доли среднемолекулярных (18,1–33,4%) и высокомолекулярных (1,2–3,0%) фракций. Это особенно четко проявляется в тундровых поверхностно-глеевых освоенных почвах в сравнении с целинными аналогами (табл. 2). В ряду гидроморфных почв торфяно-тундровые глеевые имеют более высокую долю высокомолекулярной и среднемолекулярной фракций ГК по сравнению с ГК торфянисто-тундровой глеевой почвы. С повышением степени гидроморфизма происходит увеличение как показателя молекулярной массы отдельных фракций, так и средневзвешенной молекулярной массы (M_w). Для средне- и низкомолекулярной фракций ГК торфяно-тундровой глеевой почвы M_r составляет 83 и 5,3 кДа, соответственно, что выше, чем у ГК торфянисто-тундровой глеевой (65 и 3,9 кДа, соответственно). Доля низкомолекулярной фракции ГК торфянисто-тундровой глеевой почвы несколько выше.

Сравнительный анализ ММР гуминовых кислот показал значительное увеличение доли низкомолекулярной фракции в составе ГК тундровых почв по сравнению с ГК сезонно-промерзающих почв средней тайги [1].

Из данных таблиц 1 и 2 видно, что чем выше ароматичность и мольное отношение $x(H) : x(C)$ ГК препаратов, тем ниже их молекулярная масса. В тундровых поверхностно-глеевых почвах обеспечиваются лучшие условия для разложения органического материала с образованием низкомолекулярных и более устойчивых

Таблица 2. Молекулярно-массовое распределение гумусовых веществ тундровых почв

Горизонт (глубина, см)	Гуминовые кислоты													Фульво-кислоты	
	Высокомолек. фракция			Среднемолек. фракция				Низкомолек. фракция				M_w , кДа	S	M_r , кДа	S
	M_r , кДа	ω , %	S	M_r , кДа	S	ω , %	S	M_r , кДа	S	ω , %	S				
<i>Торфяно-тундровая глеевая</i>															
О (0–10)	≥600	3,0	0,4	83,1	2,8	33,4	0,1	5,27	0,07	63,6	0,5	49	4	2,72	0,03
Т (10–20)	≥600	2,46	0,01	66,8	1,5	31	4	3,83	0,03	66	4	37,8	2,5	4,41	0,02
<i>Торфянисто-тундровая глеевая</i>															
О (0–9)	≥600	2,24	0,01	65	11	29	4	3,86	0,08	68	4	34,9	0,7	1,45	0,01
О (0–9)*	≥600	1,46	0,01	61,6	1,7	19,4	1,3	3,3	0,1	79,2	1,3	23,3	1,1	–	–
<i>Тундровая поверхностно-глеевая</i>															
А0 (0–5)	≥600	2,21	0,01	77,3	1,0	29,6	0,4	5,01	0,10	68,2	0,4	39,5	0,6	3,00	0,18
<i>Тундровая поверхностно-глеевая освоенная</i>															
Адер. (0–5)	≥600	1,16	0,25	67	4	18,1	0,3	2,55	0,05	80,8	0,6	21,1	2,5	1,73	0,07

Примечания: ω — массовая доля фракции; S — стандартное отклонение; M_w — средневзвешенная молекулярная масса; * — данные для «гидролизного образца».

конденсированных структур, характеризующихся меньшим содержанием лабильных фрагментов, что может быть связано с большей динамичностью почвенного климата в поверхностных горизонтах. При переходе от горизонта О к горизонту Т торфяно-тундровой глеевой почвы происходит накопление более устойчивых групп ГК с меньшей долей высоко- и среднемoleкулярных фракций. Это хорошо согласуется с увеличением ароматичности и уменьшением доли алифатических и О,N-алкильных фрагментов в структуре ГК.

Гидролиз периферической части молекул ГК торфянисто-тундровой глеевой почвы сопровождается уменьшением средней молекулярной массы и доли высоко- и среднемoleкулярной фракций, что хорошо согласуется с увеличением ароматичности с 28,3 до 33,6%.

Установлена достаточно высокая корреляционная зависимость массовой доли высоко- и среднемoleкулярных фракций ГК с содержанием лабильных фрагментов ω ($C_{O,N-alkyl}$) и ω ($C_{polar.}$) и достоверная корреляция содержания низкомолекулярной фракции с параметром гидрофобности ГВ, который представляет собой суммарную долю неокисленных атомов углерода ω ($C_{H-alkyl}$) + ω ($C_{H,R-arom}$) [12] и позволяет косвенно оценить амфифильные свойства ГВ (табл. 3).

Таблица 3. Значения коэффициентов корреляции массовой доли фракций ГК с массовой долей молекулярных фрагментов по данным ^{13}C -ЯМР-спектроскопии

Фракция ГК	Коэффициент корреляции, r		
	ω ($C_{H-alkyl}$) + ω ($C_{H,R-arom}$)	ω ($C_{O,N-alkyl}$)	ω ($C_{polar.}$)
Высокомолекулярная	-0,855	0,708	0,682
Среднемолекулярная	-0,931	0,787	0,766
Низкомолекулярная	0,929	-0,775	-0,753
r_{cr}	0,811		

Примечания: ω ($C_{H-alkyl}$) + ω ($C_{H,R-arom}$) — параметр гидрофобности; ω ($C_{polar.}$) — массовая доля полярных атомов углерода, ω ($C_{polar.}$) = ω ($C_{O,N-alkyl}$) + ω (C_{COOH}) + ω (C_{CON}); r_{cr} — критическое значение коэффициента корреляции.

Полученные результаты изучения ММР ГК тундровых почв в большей степени соответствуют гипотезе Трубецкого—Семс-Хименеса [6, 7], согласно которой высокомолекулярные фракции ГК состоят преимущественно из разветвленных парафиновых структур с высоким содержанием углеводных, спиртовых, метоксильных и аминокислотных фрагментов, а в низкомолекулярных фракциях ГК преобладает ароматический углерод.

Сравнительно высокое (80,8%) содержание низкомолекулярной фракции ГК в освоённой почве может быть обусловлено продолжительным сельскохозяйственным использованием, приводящим к повышению биологической активности почв в летний период и более жестким температурным условиям в зимний. Трансформация органического вещества освоённых почв в таких условиях приводит к отрыву периферических цепей и уменьшению молекулярной массы ГК. Аналогичное влияние криогенных процессов на состав гумуса наблюдалось рядом исследователей, которыми выявлено, что процессы промерзания и оттаивания существенно влияют на изменение фракционно-группового состава гумуса, а также способствуют расщеплению молекул ГК до более низкомолекулярных фрагментов [14–16].

Результаты изучения ММР для препаратов ФК тундровых почв показали, что для них характерно содержание только одной низкомолекулярной фракции с M_r от 1,5 до 4,4 кДа. В ряду тундровых поверхностно-глеевых почв установлено, что молекулярная масса ФК в освоенных почвах почти в 2 раза меньше, чем в целинных аналогах. Низкая M_r ФК тундровых поверхностно-глеевых освоенных почв обусловлена повышенной минерализацией злаковой растительности по сравнению с кустарниковым и мохово-лишайниковым опадом тундровых поверхностно-глеевых целинных почв. В освоенных почвах происходит более быстрое «омолаживание» ФК, которые наиболее интенсивно перерабатываются микроорганизмами.

Заключение

Исследования молекулярно-массового распределения препаратов гумусовых веществ, выделенных из тундровых почв, свидетельствуют о том, что ГК содержат три фракции с разной молекулярной массой: ≥ 600 , 62–83 и 2,6–5,3 кДа; ФК — одну фракцию — 1,5–4,4 кДа. В целом ГК тундровых почв характеризуются высоким содержанием низкомолекулярной фракции, а доля высокомолекулярной фракции невелика и составляет 2,2–3,0%. Отличительной особенностью ГВ тундровых почв являются близкие значения M_r низкомолекулярной фракции гуминовых кислот и M_r фульвокислот. Установлены высокие корреляции между содержанием высоко- и среднемолекулярных фракций с долей лабильных фрагментов и низкомолекулярной фракции с содержанием гидрофобных фрагментов ГК. Освоение тундровых поверхностно-глеевых почв приводит к уменьшению доли высокомолекулярных фракций в составе ГК, что, по-видимому, связано с более холодными климатическими условиями для этих почв.

Литература

1. Лодыгин Е. Д., Безносиков В. А., Василевич Р. С. Изучение полидисперсности гумусовых веществ методом гель-хроматографии // Докл. Россельхозакадемии. 2012. № 4. С. 24–27.
2. Трубецкой О. А., Трубецкая О. Е. ^{13}C -ЯМР анализ компонентов гуминовой кислоты чернозема и ее фракций различного молекулярного размера и электрофоретической подвижности // Почвоведение. 2011. № 3. С. 311–316.
3. Ширишова Л. Т., Ермолаева М. А. Состояние гуминовых веществ почв в водных растворах по результатам электрофореза и гель-хроматографии на сефадексах // Почвоведение. 2001. № 8. С. 955–962.
4. Schnitzer M. Humic substances, chemistry and reactions // Soil organic matter. Amsterdam, 1978. P. 10.
5. Попов А. И. Гуминовые вещества: свойства, строение, образование / под ред. Е. И. Ермакова. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2004. 248 с.
6. Трубецкая О. Е., Трубецкой О. А., Афанасьева Г. В. и др. Аминокислотный состав гуминовых кислот из различных по генезису почв, фракционированных сочетанием гель-хроматографии и электрофореза // Изв. РАН. Сер. биол. 1999. № 1. С. 84–88.
7. Saiz-Jimenez C., Hermosin B., Trubetskaya O. E., Reznikova O. I., Afanas'eva G. V., Trubetskoj O. A. Thermochemolysis of genetically different soil humic acids and their fractions obtained by tandem SEC-PAGE // Geoderma. 2006. Vol. 131, N 1–2. P. 22–32. DOI: 10.1016/j.geoderma.2005.03.001.
8. Атлас почв Республики Коми / под ред. Г. В. Добровольского, А. И. Таскаева, И. В. Забоевой. Сыктывкар: ООО «Коми республиканская типография», 2008. 356 с.
9. Мажитова Г. Г. Температурные режимы почв в зоне сплошной многолетней мерзлоты европейского северо-востока России // Почвоведение. 2008. № 1. С. 54–67.
10. Безносиков В. А., Лодыгин Е. Д. Фракционно-групповой состав гумусокриогенных поверхностно-глеевых и гидроморфных почв Большеземельской тундры // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 3. Биология. 2012. Вып. 1. С. 107–120.

11. Swift R. S. *Methods of Soil Analysis* / Madison (WI) // *Soil Sci. Soc. Amer.*, 1996. Pt 3. P. 1018–1020.
12. Лодыгин Е. Д., Безносиков В. А., Василевич Р. С. Молекулярный состав гумусовых веществ тундровых почв (¹³C-ЯМР-спектроскопия) // *Почвоведение*. 2014. № 5. С. 546–552. DOI: 10.7868/S0032180X14010079.
13. Досон Р., Эллиот Д., Эллиот У., Джонс К. *Справочник биохимика*. М.: Мир, 1991. 544 с.
14. Арчегова И. Б. Влияние промораживания на сорбцию, состав, свойства гумусовых веществ // *Почвоведение*. 1979. № 11. С. 39–49.
15. Дергачева М. И., Дедков В. С. Влияние промерзания–оттаивания на органическое вещество почв приобской лесотундры // *Экология*. 1977. № 2. С. 23–32.
16. Ширишова Л. Т., Гиличинский Д. А., Остроумова Н. В., Ермолаев А. М. Применение методов оптической спектроскопии для исследования гуминовых веществ мерзлых толщ // *Криосфера Земли*. 2013. Т. XVII, № 4. С. 94–104.

References

1. Lodygin E. D., Beznosikov V. A., Vasilevich R. S. Study of polydispersity of humic substances by the gel chromatography method. *Russian Agricultural Sciences*, 2012, vol. 38, no. 4, pp. 293–296. DOI: 10.3103/S1068367412040118.
2. Trubetskoi O. A., Trubetskaya O. E. ¹³C-NMR analysis of components of chernozem humic acids and their fractions with different molecular sizes and electrophoretic mobilities. *Eurasian Soil Science*, 2011, vol. 44, no. 3, pp. 281–285. DOI: 10.1134/S1064229311030148.
3. Shirshova L. T., Ermolaeva M. A. The state of soil humic substances in aqueous solutions as seen from electrophoresis and gel chromatography data. *Eurasian Soil Science*, 2001, vol. 34, no. 8, pp. 850–856.
17. Schnitzer M. Humic substances, chemistry and reactions. *Soil organic matter*. Amsterdam, 1978, pp. 10.
18. Popov A. I. *Guminovye veshchestva: svoistva, stroenie, obrazovanie* [Humic substances: properties, structure, and synthesis]. Ed. by E. I. Ermakov. St. Petersburg, S.-Peterb. un-t Publ., 2004. 248 p. (In Russian)
6. Trubetskoi O. A., Trubetskaya O. E., Reznikova O. I., Afanas'eva G. V. Electrophoretic test for efficiency of soil humic acids fractionation by gel chromatography and ultrafiltration. *Biology Bulletin*, 1999, vol. 26, no. 2, pp. 170–173.
19. Saiz-Jiminez C., Hermosin B., Trubetskaya O. E., Reznikova O. I., Afanas'eva G. V., Trubetskoj O. A. Thermochemolysis of genetically different soil humic acids and their fractions obtained by tandem SEC–PAGE. *Geoderma*, 2006, vol. 131, no. 1–2, pp. 22–32. DOI: 10.1016/j.geoderma.2005.03.001.
20. *Atlas pochv Respubliki Komi* [Soil Atlas of the Komi Republic]. Eds G. V. Dobrovolskii, A. I. Taskaev, I. V. Zaboeva. Syktyvkar, OOO «Komi respublikanskaia tipografiia», 2008. 356 p. (In Russian)
9. Mazhitova G. G. Soil temperature regimes in the discontinuous permafrost zone in the east European Russian Arctic. *Eurasian Soil Science*, 2008, vol. 41, no. 1, pp. 48–62. DOI: 10.1007/s11475-008-1006-5.
10. Beznosikov V. A., Lodygin E. D. Fraction-group humus composition of cryogenic surfacegley and hydromorphic soils of the Bol'shezemel'skaya tundra. *Vestnik of Saint-Petersburg University. Series 3. Biology*. 2012, issue 1, pp. 107–120. (In Russian)
21. Swift R. S. *Methods of Soil Analysis*. Madison (WI). *Soil Sci. Soc. Amer.*, 1996, part 3, pp. 1018–1020.
12. Lodygin E. D., Beznosikov V. A., Vasilevich R. S. Molecular composition of humic substances in tundra soils (¹³C-NMR spectroscopic study). *Eurasian Soil Science*, 2014, vol. 47, no. 5, pp. 400–406. DOI: 10.1134/S1064229314010074.
22. Doston R., Elliot D., Elliot U., Dzhons K. *Spravochnik biokhimika* [Data for biochemical research]. Moscow, Mir Publ., 1991. 544 p. (In Russian)
23. Archegova I. B. Vliianie promorazhivaniia na sorbtsiiu, sostav, svoistva gumusovykh veshchestv [Effect of freezing on the sorption, structure, properties of humic substances]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 1979, no. 11, pp. 39–49. (In Russian)
24. Dergacheva M. I., Dedkov V. S. Vliianie promerzaniia–ottaivaniia na organicheskoe veshchestvo pochv priobskoi lesotundry [Influence of freezing and thawing of soil organic matter in the forest-tundra Ob]. *Ekologiia* [Ecology], 1977, no. 2, pp. 23–32. (In Russian)
16. Shirshova L. T., Gilichinsky D. A., Ostroumova N. V., Yermolayev A. M. Investigation of humic substances from frozen strata, using optical spectroscopy. *Earth Cryosphere*, 2013, vol. XVII, no. 4, pp. 94–104.

Статья поступила в редакцию 27 июля, принята 9 октября 2015 г.

Сведения об авторах:

Василевич Роман Сергеевич — кандидат биологических наук, научный сотрудник

Лодыгин Евгений Дмитриевич — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник

Безносиков Василий Александрович — доктор сельскохозяйственных наук, зав. лаб. химии почв

Vasilevitch Roman S. — PhD, Researcher

Lodygin Evgeniy D. — PhD, Senior researcher

Beznosikov Vasily A. — Doctor of Agricultural Sciences, Head of soil chemistry Department