

УДК 631.41

## **Подвижные гумусовые вещества в подзолах лесотундровой зоны**

**А.П. Учаев, О.А. Некрасова**

Уральский федеральный университет имени первого Президента России  
Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург, Россия)

*Исследования выполнены при поддержке гранта Правительства РФ  
(договор № 11.G34.31.0064).*

Рассматривается групповой и фракционный состав гумуса и отдельные фи-зико-химические характеристики подзолов криогенно-глеевых Al-Fe-гумусовых на почвообразующих породах, имеющих различный гранулометрический состав, сформировавшихся под разными растительными сообществами лесотундры Западной Сибири. Приведены запасы органического углерода в этих почвах. На основании различных теоретических подходов определен вклад лабильных гумусовых веществ в общий почвенный пул углерода. Показано, что не менее трети запасов органического углерода в подзолах лесотундры находится в составе относительно подвижных гумусовых веществ, которые в первую очередь могут подвергаться минерализации в случае потепления климата.

*Ключевые слова:* Западная Сибирь; лесотундра; мерзлотные почвы; подзол; гумус; подвижные гумусовые вещества.

### **Введение**

В последнее время изменения глобального климата стали общепризнанным фактом, при этом они наблюдаются в разных природных зонах и фиксируются практически всеми компонентами экосистем [1]. Почва является надежным индикатором изменений природной среды и климата. Глобальное потепление может повлечь за собой дальнейшее изменение цикла углерода, особенно на территории распространения многолетнемерзлого слоя. В стабильных условиях система гумусовых веществ находится в состоянии равновесия, означающего динамический баланс между вновь образуемыми и минерализуемыми фрагментами макромолекул. В этом случае доля  $\text{CO}_2$ , выделяющаяся за счет минерализации гумуса, оценивается в 1,1–4,2% от общей эмиссии [2]. Однако даже в процессе сезонного оттаивания мерзлотных почв фиксируется разрушение криогенных агрегатов, влекущее за собой резкое возрастание подвижности органического вещества в их профиле [3]. В случае направленных изменений условий функционирования системы гумусовых веществ (например, в результате потепления) процессу минерализации дополнительно будут подвергаться

в первую очередь подвижные гумусовые вещества, что, безусловно, отразится на почвенной эмиссии диоксида углерода.

В настоящее время вопросу общих запасов углерода в разных типах почв Заполярья посвящен ряд публикаций [4–6 и др.]. Дальнейшее накопление данных по пулам углерода в почвах мерзлотных территорий конкретных условий функционирования необходимо для получения целостной картины стоков этого элемента. Однако для прогнозных оценок поведения почв необходимы также сведения о доли подвижных форм гумуса, представляющих собой наименее устойчивую его часть.

Цель исследования — установить вклад лабильных гумусовых веществ в общие запасы органического углерода подзолов лесотундры.

### Материалы и методики исследования

Территория исследования расположена в лесотундровой зоне на левом берегу р. Оби в районе г. Лабытнанги. Среднегодовая температура воздуха изучаемого района составляет  $-7,1^{\circ}\text{C}$ , средняя температура воздуха самого холодного месяца — минус  $24,4^{\circ}\text{C}$ , самого теплого —  $+13,7^{\circ}\text{C}$ . Средняя продолжительность безморозного периода три месяца. Число дней с температурой выше  $10^{\circ}\text{C}$  немногим превышает 60. Сумма средних суточных температур воздуха  $>10^{\circ}\text{C}$  составляет около  $800^{\circ}\text{C}$ , среднегодовых осадков — 400 мм/г [7]. Рельеф изучаемой территории Ямало-Ненецкого автономного округа равнинный, почвообразующими породами являются четвертичные наносы суглинистого и песчано-суглинистого состава.

На типичном для лесотундры участке площадью 1 км<sup>2</sup> около 3/4 его площади оказалось под тундровой растительностью, примерно 1/10 — под редколесьем, остальная территория пришлась на болота и ложбины стока. На участках с относительно хорошим дренажом как под бугристой кустарничково-мохово-лишайниковой тундрой, так и под кустарничково-лишайниково-лиственничным редколесьем сформированы подзолы, которые были вскрыты разрезами 3.3.1 и 3.4.1 соответственно.

Образцы почв отбирались в пределах видимых горизонтов подробно, каждые 5–10 см, из верхней 20-сантиметровой почвенной толщи дополнительно были взяты пробы для определения объемной массы, необходимой для расчета запасов элементов. Подготовка к анализу осуществлялась по стандартной методике. Значения pH водной и солевой вытяжки определялись потенциометрическим методом, с помощью Аниона 4100, гидролитическая кислотность — по Каппену—Гильковицу. Общий углерод определялся по Тюрину, групповой и фракционный состав гумуса — методом Пономаревой—Плотниковой [8].

### Результаты исследования и обсуждение

Разрез 3.3.1, заложенный в лиственничном редколесье, имеет следующее морфологическое строение (см. рис. 1):

- |                          |   |
|--------------------------|---|
| A <sub>0</sub> 0–1 см    | Опад багульника, сфагнома и зеленых мхов, переплетенный корнями растений  |
| A <sub>2</sub> 1–3(4) см | Имеет прерывистый характер, светло-серый, рыхлый с включениями мелких корней бесструктурный легкий суглинок, граница волнистая, переход по окраске и плотности резкий |

$B_{nf}$	3(4)–7(8) см	Серо-бурый, более плотный, чем вышележащий, с включениями мелких и средних корней средне-мелкоореховатый легкий суглинок, граница волнистая, переход по окраске резкий
$B_{g1}$	7(8)–52 см	Светло-бурая, со светло-серыми и сизоватыми пятнами, имеющая такое же, как в предыдущем горизонте, сложение, с редкими включениями корней, пластинчатая супесь, граница ровная, переход по плотности заметный
$B_{g2}$	52–120 см	Светло-бурый, со светло-серыми и сизоватыми глеевыми пятнами, составляющими 50% площади, более плотный, по сравнению с предыдущим горизонтом, с включениями единичных корней до глубины 63 см, со слабовыраженной пластинчатой структурой легкий суглинок. С глубины 102 см горизонт $B_{g2}$ становится тиксотропным. Многолетнемерзлый слой залегает на глубине 233 см

Почва под тундровым сообществом, вскрытая разрезом 3.4.1, имеет следующее морфологическое строение (см. рис. 1):

$A_o$	0–1(2) см	Полуразложившиеся растительные остатки, переплетенные корнями
$A_2$	1(2)–4 см	Светло-серая, рыхлая, с включениями единичных корней бесструктурная супесь, граница ровная, переход по окраске резкий. Горизонт имеет фрагментарный характер, местами отсутствует
$B_{nf}$	4–6 см	Бурая, рыхлая, с включениями мелких корней среднекомковатая супесь, граница волнистая, переход по окраске ясный, местами резкий. Горизонт тиксотропный
$B_g$	6–25 см	Сизо-серая, рыхлая, с включениями мелких корней среднекомковатая супесь. Горизонт тиксотропный. С 25 см разрез затоплен водой, многолетнемерзлый слой начинается со 149 см

Сравниваемые почвенные разрезы формируются на суглинках и супесях, их подзолистые горизонты, имеющие мощность не более 3 см, залегают непосредственно под подстилкой. Железисто-гумусовые горизонты также являются маломощными. Морфологическое строение обеих почв соответствует подзолу криогенно-глеевому Al-Fe-гумусовому. Названия почвам даны в соответствии с основополагающей работой, в которой приведены результаты исследования почв исследуемой территории [9]. В соответствии с Международной реферативной базой эти почвы диагностируются как Albic Gleyic Podzols [10]. Наличие глеевого горизонта в разрезе 3.4.1 обусловлено более тяжелым гранулометрическим составом почвы под тундровым сообществом. Мощность активного слоя в сравниваемых подзолах различается практически в полтора раза, что обусловлено как различиями их гранулометрического состава, так и особенностями растительных сообществ, под которыми они функционируют.



а

Лиственничное редколесье



Бугристая кустарничково-мохово-лишайниковая тундра



б

Подзол криогенно-глеевый  
Al-Fe-гумусовый (Р.3.3.1)Подзол криогенно-глеевый Al-Fe-гумусовый  
(Р.3.4.1)

Рис. 1. Лесотундровые растительные сообщества (а) и профили почв (б)

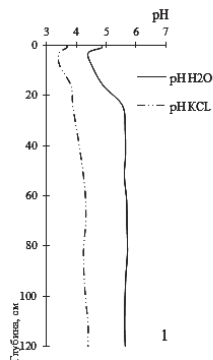
Обе лесотундровые почвы (рис. 2) имеют кислую реакцию среды ( $\text{pH}_{\text{KCl}}$  не превышает 4,4). Значения  $\text{pH}$  в минеральных горизонтах увеличиваются с глубиной почвенного профиля. Актуальная кислотность, обусловленная почвенными органическими кислотами, имеет большие значения в почве редколесья. Значения гидролитической кислотности максимальны в органических горизонтах и различаются в сравниваемых почвах практически в 2 раза, составляя 13 и 25 ммоль/кг. В минеральных горизонтах значения этого показателя составляют 1–3 ммоль/кг почвы. Таким образом, гумусообразование происходит в кислой среде, обусловленной биогенным фактором.

Распределение органического углерода в изучаемых разрезах (рис. 3) носит регрессивно-аккумулятивный характер [11]. В разрезе 3.3.1 значение содержания углерода уменьшается от 18% в горизонте подстилки до сотых долей процента в горизонте  $\text{B}_2$ . В разрезе 3.4.1 максимальное содержание углерода в органическом горизонте составляет около 9%, минимальное значение приходится на глеевый горизонт. Содержание углерода в подзолистом и железисто-гумусовом горизонте почвы под лиственничным редколесьем в 3 раза выше по сравнению с аналогичными горизонтами почвы под тундровой группировкой.

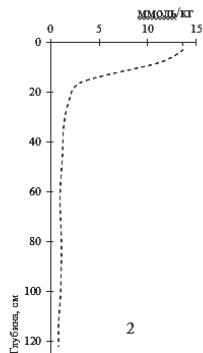
Гумус изучаемых почв в верхней 25-сантиметровой толще имеет близкий состав (рис. 4).

Фульвокислоты являются доминирующей группой гумусовых веществ, в подзолистых горизонтах их содержание достигает 67%. Гуминовые кислоты представлены в наименьших количествах. Это отражается на соотношении  $\text{C}_{\text{ГК}}:\text{C}_{\text{ФК}}$ ,

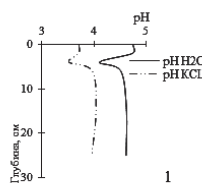
значение которого, за исключением органогенного горизонта, не превышает 0,5 и соответствует фульватному составу гумуса. Негидролизуемые формы гумуса в наименьших количествах обнаружены в горизонте  $A_2$ .



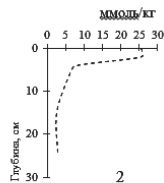
Р. 3.3.1



Р. 3.4.1

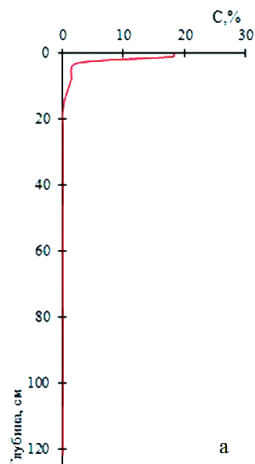


1

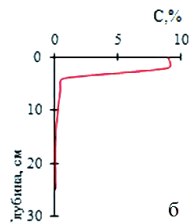


2

Рис. 2. Некоторые физико-химические характеристики почв: 1 — pH водной и солевой вытяжки; 2 — гидролитическая кислотность



а



б

Рис. 3. Распределение общего органического углерода по почвенному профилю (а — разрез 3.3.1, б — разрез 3.4.1)

Фракция наиболее подвижных бурых ГК1 превалирует над другими фракциями гуминовых кислот, её содержание в отдельных горизонтах превышает 80% от суммы гуминовых кислот. Количество этих свободных и связанных с полуторными окислами гуминовых кислот в целом убывает с глубиной почвенного профиля. Фракция гуминовых кислот, связанная с глинистыми частицами (ГК3), имеет среднее содержание в составе гумуса, не превышающее 8%. Фракция черных гуминовых кислот (ГК2), связанная с кальцием, присутствует в наименьшем количестве, а в некоторых горизонтах не обнаружена. Среди фульвокислот преобладают связанная с бурыми гуминовыми кислотами (ФК1) и агрессивная (ФК1а) фракции.

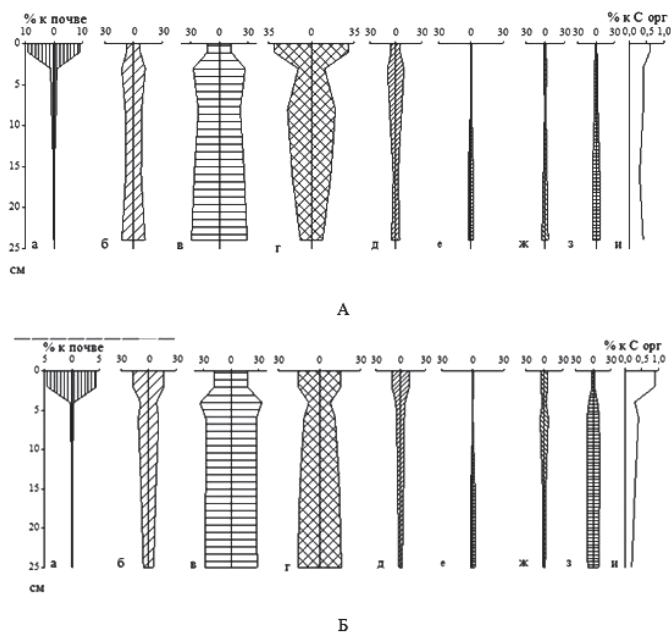


Рис. 4. Гумусовый профиль подзолов под редколесьем (А) и тундровым сообществом (Б): *a* – общий органический углерод, % к почве; % к общему органическому углероду; *b* – сумма гуминовых кислот (ГК); *в* – сумма фульвокислот (ФК); *z* – негидролизуемые формы гумуса; *д* – ГК фр.1; *е* – ГК фр. 2; *ж* – ГК фр. 3; *з* – ФК фр. 1а; *u* –  $C_{ГК} : C_{ФК}$

Итак, в составе гумуса преобладают фракции агрессивных и связанных с бурыми гуминовыми кислотами фульвокислот, значительную долю также имеет фракция свободных и связанных с полутормными окислами гуминовых кислот.

К выделению среди гумусовых кислот устойчивых и лабильных веществ в настоящее время существует два основных теоретических подхода. В соответствии с [8, 12], подвижные гумусовые вещества представляют собой извлекаемые 0,1н. NaOH вытяжкой бурые, находящиеся в почве либо в свободном состоянии, либо в форме непрочных соединений с полуторными окислами, и связанные с ними фульвокислоты. Среднее содержание этих гумусовых веществ в верхних 20 см почвенных профилей составляет 38% для подзола под редколесьем и 31% для подзола под тундровым сообществом.

По мнению [13], к устойчивым гумусовым веществам относятся гуминовые кислоты и гумин; фульвокислоты принадлежат к группе лабильных веществ. Среднее суммарное содержание фульвокислот в верхней 20-сантиметровой почвенной толще в лиственничнике и тундре равно 47 и 54% соответственно.

Запасы углерода в верхних 20 см изучаемых подзолов оцениваются как очень низкие [13] и различаются под разными растительными сообществами более чем в 2 раза (рис. 5). Большее накопление органического углерода в почве редколесья, вероятно, связано с особенностями химического состава лиственницы, в большей степени благоприятствующего процессу гумусообразования. Рассчитанные

запасы получились несколько ниже, чем в аналогичных почвах горной части Приполярья, что связано с различиями на порядок в мощности органических горизонтов этих почв [5].

При этом запасы подвижных фракций гумусовых веществ в этой же почвенной толще, рассчитанные как сумма ГК1 и ФК1, составляют 7,9 т/га в почве под древесной растительностью и 2,9 т/га — под тундровой; а как сумма всех ФК — 9,8 и 5,1 т/га соответственно.

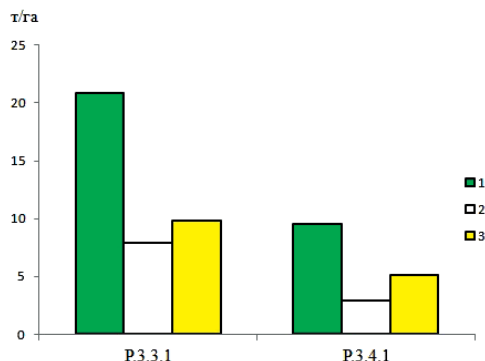


Рис. 5. Запасы углерода в составе гумуса и его подвижных форм в верхних 20 см почвы: 1 — общий органический углерод; 2 — углерод подвижных фракций (ГК1+ФК1); 3 — углерод подвижных фракций (сумма ФК)

## Заключение

Подзолы криогенно-глеевые Al-Fe-гумусовые, формирующиеся на породах различного гранулометрического состава под разными растительными сообществами лесотундры, достаточно близки по своим физико-химическим свойствам. В групповом и фракционном составе их гумуса также обнаружено сходство, заключающееся в ведущем вкладе среди фульвокислот агрессивной фракции ФК1а и связанной с бурыми гуминовыми кислотами фракции ФК1, а среди гуминовых кислот — фракции бурых ГК. Запасы углерода в почве лишайникового редколесья в два раза превышают таковые для почвы кустарничково-мохово-лишайниковой тундры и в обоих случаях являются очень низкими. Однако лабильные гумусовые вещества, подсчитанные в соответствии с разными подходами, составляют от 31–38 до 47–54% от общих запасов почвенного углерода.

Таким образом, не менее трети гумусовых веществ подзолов лесотундры представлено наименее стабильными подвижными фракциями гумуса, что может привести к быстрому увеличению эмиссии CO<sub>2</sub> из почвы в случае глобального потепления климата.

## Литература

- [1] *Изменение климата*, 2001 г. 3-й доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Норвегия : ЮНЕП/ГРИД Арсенал, 2003. 220 с.
- [2] Орлов Д.С., Бирюкова О.Н. Устойчивость органических соединений почвы и эмиссия парниковых газов в атмосферу // Почвоведение. 1998. № 7. С. 783–793.



- [3] Дергачева М.И., Дедков В.С. Влияние промерзания – оттаивания на органическое вещество почв приобской лесотундры // Экология. 1977. № 2. С. 23–32.
- [4] Tarnocai C., Canadell J.G., Schuur E.A.G. et al. Soil organic carbon pools in the northern circum-polar permafrost region // Global Biogeochemical Cycles. 2009. Vol. 23. GB2023. doi: 10.1029/2008GB003327.
- [5] Дымов А.А., Жангузов Е.В., Старцев В.В. Почвы северной части Приполярного Урала: морфология, физико-химические свойства, запасы углерода и азота // Почвоведение. 2013. № 5. С. 507–516.
- [6] Пастухов А.В., Каверин Д.А. Запасы почвенного углерода в тундровых и таежных экосистемах Северо-Восточной Европы // Почвоведение. 2013. № 9. С. 1084–1094.
- [7] URL: <http://g-salekhard.ru/geografija-i-klimat-saleharda.html>.
- [8] Пономарева В.В., Плотникова Т.А. Методические указания по определению содержания и состава гумуса в почвах. Л., 1975. 106 с.
- [9] Дедков В.П. Почвы // Природа Ямала. Екатеринбург : УИФ «Наука», 1995. С. 103–127.
- [10] World Reference Base for soil resources. World Soil Resources Reports. IUSS Working Group WRB. FAO, Rome. № 103. 145 p.
- [11] Розанов Б.Г. Морфология почв. М. : Академ. проект, 2004. 432 с.
- [12] Пономарева В.В., Плотникова Т.А. Гумус и почвообразование. Л. : Наука, 1980. 222 с.
- [13] Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М. : Изд-во МГУ, 1990. 325 с.

### Сведения об авторах

**Учаев Антон Павлович** – аспирант кафедры экологии биологического факультета Уральского федерального университета им. первого президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург). E-mail: antonio21@inbox.ru

**Некрасова Ольга Анатольевна** – доцент, кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии биологического факультета Уральского федерального университета им. первого президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург, Россия). E-mail: o\_nekr@mail.ru

**Anton P. Uchaev, Olga A Nekrasova**

Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin

**THE RESEARCH IN URAL FEDERAL UNIVERSITY IS SUPPORTED BY GRANT OF GOVERNMENT OF RUSSIAN FEDERATION, THE AGREEMENT № 11.G34.31.0064**

Under stable conditions, the system of soil humic substances is in a state of equilibrium, meaning the dynamic balance between the newly formed and mineralized fragments of macromolecules. In the process of global warming of the climate, which is showing more intensively in the territory of permafrost distribution, the system of soil humic substances can leave its state. In this case primarily mobile humic substances, which are the least stable part will be subjected to additional mineralization, that will increase soil CO<sub>2</sub> emissions. The information about stocks of carbon in various humus forms in soils of different forming conditions is required for long-term forecasting of soil behavior. The aim of the work was to establish the contribution of labile humic substances to organic carbon stocks in forest-tundra Podzols. For this reason soil humus characteristics and connected with them physical-chemistry ones were obtained for the purpose of calculating carbon stocks in various humus forms in the typical for West Siberian plain forest-tundra Podzols cryogenic gley Al-Fe-humus (Albic Gleyic Podzol). These soils are formed under forest (Section 3.3.1) and lichen plant communities (Section 3.4.1), have various soil textures and the depth of permafrost table ranges in 1.5 times. Both soils have the acid reaction (pHKCl is less than 4.4), pH decreases in the lower soil horizons. The volumes of hydrolytic acid reached 13–25 mmol/kg of the soil in the organic horizons, but in mineral horizons it lowers till average 1–3 mmol/kg of the soil. The distribution character of organic carbon in the studied soils is regressive-accumulative. The maximum content (9–18%) was found in the surface horizons, the minimum – on the lower part of



the soil profile, where it amounts to 0.04–0.09%.

Carbon stocks in the upper 20 cm of studying soils vary in more than 2 times under different vegetation communities, accounting for 950–2090 t/ km<sup>2</sup>. It corresponds to the very low level. Maximum values occur in Podzol under larch community. The humus content of the studying soils is rather similar. The aggressive fraction of fulvic acids and related with brown humic acids fulvic acids are dominated in the composition of humus, a significant share is also on brown humic acids. According to one theoretically approach, mobile humic substances are those, that can be extracted by 0,1 n NaOH. The average amount of these mobile fractions in the upper 20 cm of studying soils is 38% for Podzol under larch community and 31% for Podzol under lichen community. According to the other view, mobile humic substances are the fulvic acids. The average fulvic acid content in the same soil layers is 47% and 54%, respectively. Thus, more than one third of forest-tundra podzol humus substances exist in less stable, mobile humus fractions, which may cause to the rapid increase of soil CO<sub>2</sub> emissions in the case of global warming.

**Keywords:** Western Siberia; forest-tundra; permafrost; Podzol; humus; mobile humus substances.

## Reference

- [1] Изменение климата, 2001 г. 3-й доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Норвегия : YuNEP/GRID Arsenal, 2003. 220 p.
- [2] Orlov D.S., Biryukova O.N. Ustoychivost' organicheskikh soedineniy pochvy i emissiya parnikovykh gazov v atmosferu // *Pochvovedenie*. 1998. No. 7. P. 783–793.
- [3] Dergacheva M.I., Dedkov B.C. Vliyaniye promerzaniya – ottaivaniya na organicheskoe veshchestvo pochv priobskoy lesotundry // *Ekologiya*. 1977. No. 2. P. 23–32.
- [4] Tarnocai C., Canadell J.G., Schuur E.A.G. et al. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // *Global Biogeochemical Cycles*. 2009. Vol. 23. GB2023. doi: 10.1029/2008GB003327.
- [5] Dymov A.A., Zhangurov E.V., Startsev V.V. Pochvy severnoy chasti Pripolyarnogo Urala: morfologiya, fiziko-khimicheskie svoystva, zapasy ugleroda i azota // *Pochvovedenie*. 2013. No. 5. P. 507–516.
- [6] Pastukhov A.V., Kaverin D.A. Zapasy pochvennogo ugleroda v tundrovyykh i taezhnykh ekosistemakh Severo-Vostochnoy Evropy // *Pochvovedenie*. 2013. No. 9. P. 1084–1094.
- [7] URL: <http://g-salekhard.ru/geografija-i-klimat-saleharda.html>.
- [8] Ponomareva V.V., Plotnikova T.A. Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu soedержaniya i sostava gumusa v pochvakh. L., 1975. 106 p.
- [9] Dedkov V.P. Pochvy // *Priroda Yamala*. Ekaterinburg : UIF «Nauka», 1995. P. 103–127.
- [10] *World Reference Base for soil resources*. World Soil Resources Reports. IUSS Working Group WRB. FAO, Rome. No. 103. 145 p.
- [11] Rozanov B.G. Morfologiya pochv. M. : Akadem. proekt, 2004. 432 p.
- [12] Ponomareva V.V., Plotnikova T.A. Gumus i pochvoobrazovanie. L. : Nauka, 1980. 222 p.
- [13] Orlov D.S. Gumusovye kisloty pochv i obshchaya teoriya gumifikatsii. M. : Izd-vo MGU, 1990. 325 p.