

АГРОХИМИЯ И ПОЧВОВЕДЕНИЕ

Научная статья
УДК 631.42
doi: 10.17223/19988591/63/1

Элементный состав и структурные особенности гуминовых кислот пойменных почв дельты реки Селенга (Забайкалье, Россия)

Евгений Юрьевич Мильхеев¹, Галина Доржиевна Чимитдоржиева²,
Нимбу Доржижапович Балданов³

^{1,2} *Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, Улан-Удэ, Россия*

³ *Бурятская ГСХА им. В.П. Филиппова, Улан-Удэ, Россия*

¹ *evg-milh@rambler.ru*

² *galdorj@gmail.com*

³ *nimbu_bald@mail.ru*

Аннотация. Проведено исследование элементного состава и структуры гуминовых кислот пойменных почв дельты р. Селенга, впадающей в оз. Байкал. Территория исследований представляет собой лугово-болотный дельтовый ландшафт в лесостепной зоне. Здесь почвы и растительность являются природными биофильтрами. На генезис почв крупной дельты влияют биоклиматические условия, режим грунтовых вод и состав аллювиальных отложений. Индикатором суммы всех этих процессов является состав гумуса и гуминовых кислот почв дельты. В качестве объектов исследований выбраны аллювиальные (луговые, лугово-болотные, луговые солончаковатые) почвы, по классификации WRB – Fluvisols. Данные ЯМР-спектроскопии показали, что гуминовые кислоты аллювиальной луговой почвы более обогащены ароматическими фрагментами, чем гуминовые кислоты лугово-болотных и луговых солончаковатых почв. Несколько большая степень ароматичности в аллювиальной луговой и лугово-болотной почве связана с экологическими условиями и компонентным составом предшественников гумификации. Возрастание доли алифатических структур и снижение доли ароматических фрагментов в составе препаратов ГК луговой солончаковой почвы позволяют судить об упрощении строения гуминовой кислоты. Грунтовое увлажнение в совокупности с засолением заметно снижает скорость трансформации почвенного ОБ и приводит к увеличению доли неокисленных алифатических фрагментов.

Ключевые слова: Fluvisols, аллювиальные почвы, гумусовые вещества, ¹³C ЯМР-спектроскопия

Источник финансирования: Полевые исследования выполнены в рамках государственного задания Института общей и экспериментальной биологии СО РАН № 121030100228-4.

Для цитирования: Мильхеев Е.Ю., Чимитдоржиева Г.Д., Балданов Н.Д. Элементный состав и структурные особенности гуминовых кислот пойменных почв дельты реки Селенга (Забайкалье, Россия) // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2023. № 63. С. 6–23. doi: 10.17223/19988591/63/1

Original article

doi: 10.17223/19988591/63/1

Elemental composition and structural features of humic acids from floodplain soils of the Selenga River delta (Transbaikalia, Russia)

Evgeniy Yu. Milkheev¹, Galina D. Chimitdorzhieva², Nimbu D. Baldanov³

^{1,2} *Institute of General and Experimental Biology SB RAS, Ulan-Ude, Russian Federation*

³ *Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippova,
Ulan-Ude, Russian Federation*

¹ *evg-milh@rambler.ru*

² *galdorj@gmail.com*

³ *nimbu_bald@mail.ru*

Summary. Humic acids (HA) play a multifunctional role in the environment, controlling the biogeochemical carbon cycle, the cycle of macro- and microelements, providing nutrients and biostimulants for plant growth, are responsible for soil structure formation, and reduce the effect of toxic substances. Due to the structural heterogeneity of soil organic matter, it is very difficult to determine the composition and properties of humic acids. Currently, NMR spectroscopy is the most effective analytical method for obtaining information on the chemical composition and structure of OM.

Thus, the problem of studying the composition and structural features of humic acids isolated from the floodplain soils of the Selenga River delta, which are the youngest and most vulnerable areas of the land, is very relevant and practically not reflected in publications.

The study was conducted in the delta of the Selenga River (the world's largest freshwater delta) located in the central zone of the southeastern coast of Lake Baikal. It is a foothill tectonic depression with an area of 1,120 km² filled with deltaic, alluvial and dealluvial sediments. Its territory is located within the Kabansky district of the Republic of Buryatia and is characterized by a significant diversity of environmental conditions due to the complexity of the geomorphological structure and different degrees of hydromorphism.

Extraction of HA preparations and their purification were performed by standard methods by extraction with 0.1 n sodium hydroxide solution after preliminary decalcification. Elemental analysis of isolated HA preparations was determined on automatic elemental analyzer "CHNS/O-2400 series II" PerkinElmer (USA). Nuclear magnetic resonance spectra ¹³C-NMR were taken on spectrometer "Avance 300 MHz" Bruker (Germany) with working frequency 100.53 MHz using solid-phase CP-MAS technique.

The humus horizons of the floodplain soils of the Selenga (meadow-marsh, meadow, meadow-saline) according to the WRB classification - Fluvisols, were used as research objects. The average elemental composition of humic acids of the studied soils is rather similar. The carbon content varies in the range 37.4-43.8 mol %, hydrogen 32.3-35.0, oxygen 21.1-25.0, and nitrogen 2.2-2.6. The increase of carbon content and decrease of hydrogen amount in the studied HAs in the transition from Mollic Fluvisols (Salic) to Mollic Fluvisols is explained by the increase of condensation degree, which corresponds to the ecological conditions of soil formation and hydromorphic degree.

In general, the HAs of Mollic Fluvisols are more enriched in aromatic fragments than those of Gleyic Fluvisols and Mollic Fluvisols (Salic). It is a more "mature" product of humification. Lower degree of aromaticity as expected in HA Mollic Fluvisols (Salic). This result is supported by the H/C values, which are obtained from elemental

composition data and indicates a higher content of less decomposed hydrophilic structures.

Studies have shown that general principles of soil structure and content of elements (C, H, O, and N) in soils do not change under the influence of bioclimatic conditions, groundwater regimes, and sediment composition. But when the soil is exposed to groundwater combined with salinization, the rate of OM transformation decreases and leads to an increase in the proportion of unoxidized aliphatic fragments.

The article contains 2 Figures, 3 Table and 51 References.

Keywords: Fluvisols, alluvial soils, humic substances, ¹³C NMR-spectroscopy

Funding: Field research was performed within the framework of the state assignment of the Institute of General and Experimental Biology SB RAS No. 121030100228-4..

For citation: Milkheev EYu, Chimitdorzhieva GD, Baldanov ND. Elemental composition and structural features of humic acids from floodplain soils of the Selenga River delta (Transbaikalia, Russia). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2023;63:6-23. doi: 10.17223/19988591/63/1

Введение

Гумусовые вещества (**ГВ**) являются доминирующими компонентами органического вещества (**ОВ**) большинства минеральных почв (60–80%) и играют ключевую роль в экологической устойчивости благодаря их вкладу в биологические, химические и физические свойства почвы. ГВ образуются в результате разложения и последующей полимеризации органических остатков растительного и животного происхождения, что приводит к образованию гетерогенных супрамолекулярных частиц с большой молекулярной массой [1], содержащих различные функциональные группы, состав и свойства которых различаются в зависимости от источника ОВ и биоклиматических условий [2]. Происхождение, состав и структурные особенности ГВ до сих пор являются предметом интенсивных дискуссий и даже споров [3–8]. С физико-химической точки зрения ГВ представляют собой молекулярные агрегаты, состоящие из сахаров, жирных кислот, полипептидов, алифатических цепей и ароматических колец [9], по [10] описываются как континуум биомолекул на разных стадиях деградации.

В основу классификации ГВ положено их различие, связанное с извлечением специфических соединений из природных объектов теми или иными растворителями. По общепринятой классификации гуминовые вещества делят на гуминовые кислоты (**ГК**) (растворимы в щелочных растворах), фульвокислоты (растворимы во всем диапазоне pH) и гумины (нерастворимы во всем диапазоне pH). Эти фракции значительно различаются по размеру молекулы и содержанию функциональных групп; основными функциональными группами являются карбоксильные и фенольные, а также небольшое количество группы аминокислот [11].

ГК играют многофункциональную роль в окружающей среде, контролируя биогеохимический цикл углерода, цикл макро- и микроэлементов, обеспечивая питательными веществами и биостимуляторами рост растений,

отвечают за структурообразование почв, снижают действие токсичных веществ [12]. Существовая в почвах тысячи лет, ГК придают им стабильность, своеобразную буферность, определенный биохимический фон [13].

Важным шагом к пониманию реакционной способности, свойств и функций ГК является определение их состава и функциональных групп, что чрезвычайно сложно из-за структурной неоднородности почвенного ОВ. Для исследования структуры ГК используются различные методы, включая химическое и термическое разложение, спектроскопические методы [14, 15]. Хотя химические и термические методы могут дать структурную информацию о субъединицах и их структуре, эти данные могут быть нерепрезентативными, их трудно напрямую связать с исходной структурой почвенного ОВ. Многие спектроскопические методы, такие как инфракрасная, флуоресцентная, и спектроскопия ядерного магнитного резонанса (**ЯМР**), применялись к ГК [16, 17]. Показано [18–20], что неразрушающие спектроскопические анализы, такие как ЯМР-спектроскопия, являются лучшим выбором в сравнении с деструктивными подходами. Они позволяют получать более полную и корректную структурную информацию как в качественном, так и в количественном аспектах. Это особенно ценно при анализе препаратов различных фракций органического вещества почв, поскольку дает возможность использовать образец в дальнейших исследованиях.

По сравнению с другими спектроскопическими методами твердофазная ¹³C-ЯМР позволяет получить всестороннюю количественную и структурную информацию из ГК и, возможно, является одним из самых мощных методов для всесторонней характеристики сложных органических веществ [21, 22]. В настоящее время ЯМР-спектроскопия является наиболее эффективным аналитическим методом получения информации о химическом составе и структуре ОВ, позволяющим расширить наши представления о молекулярной структуре ГК [23].

Дельта р. Селенги – самая крупная пресноводная дельта, не имеющая аналогов в своем морфологическом ряду. От других дельт ее отличают сейсмическая активность территории, пресноводный характер вод, континентальность климата. Значимость результатов исследований предопределяется тем, что оз. Байкал имеет статус объекта мирового природного наследия ЮНЕСКО, а дельта р. Селенги рассматривается как естественный природный фильтр. Аккумулятивная направленность почвообразовательных процессов в дельте, высокая биопродуктивность и разнообразие должны были привести к образованию органического вещества, отличного от пойменных почв. Разнообразие экологических условий обуславливает формирование в дельте различных типов почв и растительных сообществ. Современные дельта и пойма заняты в основном аллювиальными почвами, древняя дельта в Калтусном тектоническом прогибе – болотными низинными почвами, плиоцен-плейстоценовые озерно-речные террасы – почвами подтайги. Основная часть дельты покрыта луговой растительностью, представляющей наиболее ценные сельскохозяйственные угодья, используемые под сенокосы и пастбища.

Большинство исследований в дельте посвящено географическим закономерностям формирования почв, биогеохимическим особенностям и микробиологическим исследованиям [24–28]; состав и структурные особенности гуминовых кислот не исследовались. Одной из наиболее сложных проблем изучения органического вещества и гумусовых веществ является исследование их молекулярной структуры. Использование современных инструментальных высокоточных физико-химических методов анализа, дающих обширную информацию о химической природе органических веществ, значительно расширяет наше понимание состава и свойств органического вещества почв [29–33].

Бассейн реки расположен в трансграничном регионе, испытывающем возрастающую антропогенную нагрузку от городов, сельскохозяйственных угодий, промышленных производств, горнодобывающей отрасли и т.д., что приводит к загрязнению речной воды, перемещающейся вниз по течению к устьевой части вместе со взвешенным, влекомым и растворенным веществами. Последним звеном в бассейновой цепочке выступает дельта реки, которая служит геохимическим барьером на пути миграции веществ вместе со стоком реки [34] и играет ключевую роль в экологии оз. Байкал.

В связи с этим целью настоящего исследования является изучение высокомолекулярных органических соединений, таких как ГК, выделенных из гумусового горизонта пойменных почв Селенгинского дельтового района, с использованием ^{13}C -ядерного магнитного резонанса. Изучение структуры ГК по ЯМР спектрам, наряду с результатами элементного анализа, необходимо для оценки экологического состояния и прогнозирования их устойчивости в условиях усиливающегося антропогенного влияния.

Объекты и методики исследования

Исследования проводили в дельте р. Селенга, расположенной в центральной зоне юго-восточного побережья оз. Байкал. Она представляет собой предгорную тектоническую впадину площадью 1 120 км², заполненную аллювиальными и делювиальными отложениями. Её территория находится в пределах Кабанского района Республики Бурятия и характеризуется значительным разнообразием экологических условий, сложностью геоморфологического строения и разной степенью гидроморфности. Карта-схема района исследования приведена на рис. 1.

Климат района резко континентальный, несколько смягченный влиянием оз. Байкал. Годовая сумма осадков достигает 400 мм, основная их часть выпадает во второй половине лета. Среднегодовая температура -1°C , средняя температура января -25°C , июля $+21^{\circ}\text{C}$. Коэффициент континентальности в межгорных впадинах Забайкалья достигает 85–90, а на побережье Байкала снижается до 67–73 [35]. Относительная мягкость климата благоприятно сказывается на продуктивности фитоценозов и процессах гумусообразования. Грунтовые воды в пойме залегают на глубине 0,5–3 м, в надпойменных террасах – на глубине 8–15 м. Дренарованность территории

дельты Селенги и промывка подтопленных зон байкальскими водами ограничивает возможность засоления почв. Тем не менее благодаря засушливому весенне-раннелетнему периоду встречается аккумуляция веществ на испарительном барьере [36].

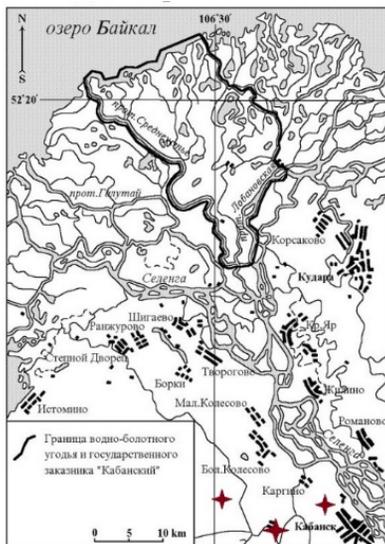


Рис. 1. Карта-схема района исследования – дельты р. Селенги

[Fig. 1. Schematic map of the study area - Selenga River delta]

Выделяют три высотных уровня в дельте: первый – это внешняя периферическая часть с отметками 455,5–457,5 м над ур. м. с притеррасными понижениями. Высокие острова дельты и центральная пойма с отметками 457,5–460,0 м составляют второй и третий уровни – высокая пойма с 460,0–464,0 м [36]. Вследствие разновысотности они имеют различные гидрологические режимы. Каждому уровню свойствен своеобразный рельеф, который обуславливает неоднородности почвенного покрова. На высоких островах преобладает грунтовое увлажнение, в центральной пойме в засушливые периоды почвы отрываются от грунтовых вод, а почвы высокой поймы развиваются преимущественно под влиянием атмосферного увлажнения.

Изучены пойменные почвы дельты Селенги: аллювиальные лугово-болотные, аллювиальные луговые и аллювиальные луговые солончаковатые по классификации WRB – Fluvisols [37], а также выделенные из гумусовых горизонтов этих почв гуминовые препараты. Ниже охарактеризуем изученные почвы.

Разрез 1 (52°00'N 106°32'E) заложен в центральной пойме в 1 км от ст. Тимлюй Кабанского района на слабонаклонной равнине под злаково-разнотравно-осоковым сообществом. Почва имеет профиль (глубины в см): AU(0-29)–C(ca)~(30–70+). Почва аллювиальная луговая среднесуглинистая

(Mollic Fluvisols по WRB). В настоящее время эти почвы не затопляются паводковыми водами, а увлажняются атмосферными осадками.

Разрез 2 (52°01'N 106°35'E) заложен около с. Закалтус под осоково-разнотравными сообществом. Профиль: AU(0–27)–AUg(28–49)–Cg[~](50–90). Почва аллювиальная лугово-болотная среднесуглинистая (Gleyic Fluvisols по WRB). Формируется в условиях длительного поверхностного и грунтового увлажнения с практически постоянной капиллярной каймой у поверхности, периодически затопливается.

Разрез 3 (52°03'N 106°37'E) заложен в 2 км от с. Кабанск под злаково-разнотравно-хвощовым сообществом на высокой пойме. Профиль: AU(0–14)–AUg(15–40)–C(ca)[~](41–70). Почва аллювиальная луговая солончаковатая среднесуглинистая (Mollic Fluvisols (Salic) по WRB).

Водные вытяжки из почв для определения сухого остатка готовили в соотношении почва к воде, равном 1:5. Содержание хлорид-иона измеряли меркурометрическим методом, сульфат-иона – турбидиметрическим, ионов натрия и калия – пламенной фотометрией, кальция и магния – атомной абсорбцией, сухой остаток – методом выпаривания и просушивания в сушильном шкафу при температуре 105°C [38].

Выделение препаратов ГК из гумусового горизонта и их очистку проводили стандартными методами [39] экстракцией 0,1 н. раствором гидроксида натрия после предварительного декальцирования. Препараты ГК очищали путем пересадения 20%-ным раствором HCl до величины pH 1,5–2,0 и многократного центрифугирования. Осадок промывали 0,1 н HCl, затем дистиллированной водой, высушивали и растирали до состояния пудры.

Элементный анализ выделенных препаратов ГК был проведен на автоматическом элементном анализаторе «CHNS/O-2400 series II» PerkinElmer (США). Спектры ядерно-магнитного резонанса ¹³C-ЯМР были сняты на спектрометре «Avance 300 MHz» Вюкег (Германия) с рабочей частотой 100,53 МГц с использованием твердофазной методики CP-MAS. Химические сдвиги представлены относительно тетраметилсилана со сдвигом 0 ppm, в качестве стандарта использовали пик адамантана (в слабом поле) при 38,48 ppm. Для количественной обработки применяли численное интегрирование по областям, соответствующим расположению функциональных групп и молекулярных фрагментов. Для оценки количественных параметров ГК использовали соотношение ароматических и алифатических фрагментов в гуминовых кислотах (AR:AL). Сигналы, обусловленные ароматическими атомами углерода, учитывали в области 95–165 ppm, алифатическими – в области 0–95 ppm. Относительное содержание ароматических атомов углерода или общая ароматичность fa=AR/(AR+AL) [19]. Степень окисленности определяли по формуле:

$$\omega = 2Q_o - Q_h / Q_c,$$

где Q_o, Q_h и Q_c – число атомов кислорода, водорода и углерода в молекуле [40].

Результаты исследования и обсуждение

Морфология и свойства пойменных дельтовых почв определяются взаимодействием аллювиальных и собственно почвообразовательных процессов. Аллювиальные почвы пойм и дельт наследуют от отлагаемого аллювия гранулометрический и минералогический составы, в значительной степени влияющие на состав органического вещества почв, обеспеченность их элементами питания. Параметры аллювиальных отложений определяются положением отдельных частей поймы по отношению к руслу реки, а также характером почв и пород водосборной территории.

Характерной особенностью гранулометрического состава пойменных почв дельты является высокая степень сортированности с преобладанием мелкого песка и крупной пыли. Эти качества обуславливают усиление испарительного эффекта в условиях грунтового питания, неустойчивость агрегатов, быстрый отрыв почв от грунтовых вод и переход почв в посталлювиальную стадию. Своеобразие дельты Селенги, связанное с ультрапресностью вод оз. Байкал, заключается в преобладании почв с реакцией среды близкой к нейтральной и слабощелочной. Повышенное содержание плотного остатка (0,67%) в водной вытяжке исследуемых почв обнаруживает наличие испарительного барьера, в результате чего реакция среды становится щелочной сначала в верхних горизонтах профиля, затем по всему профилю и, на отдельных участках приводит к накоплению водорастворимых солей в поверхностном горизонте в количестве, позволяющем отнести их к солончаковатым (табл. 1). Ионный состав водной вытяжки свидетельствует о сульфатно-натриевом типе засоления, что обусловлено высокоминерализованными почвенно-грунтовыми водами.

Таблица 1 [Table 1]

Некоторые химические свойства аллювиальных почв дельты р. Селенги
[Some chemical properties in Fluvisols of the Selenga River delta]

Горизонт [Horizon]	Глубина, см [Depth, cm]	pH водн [pH _{H2O}]	Сорг, % [Organic carbon, %]	Сумма токсичных солей, % [Total toxic salts, %]	Степень засоления [Salinity degree]
<i>Аллювиальная луговая</i> [Mollic Fluvisols]					
AU	0–29	7,5±0,2	4,04±0,3	0,132±0,009	Нет засоления
<i>Аллювиальная лугово-болотная</i> [Gleyic Fluvisols]					
AU	0–27	6,8±0,2	2,43±0,1	0,157±0,011	Нет засоления
<i>Аллювиальная луговая солончаковатая</i> [Mollic Fluvisols (Salic)]					
AUs	0–14	8,3±0,2	2,49±0,2	0,670±0,015	Среднезасоленные

Отмеченная тенденция к засолению является отличительной чертой дельтовых почв и не характерна для поймы Селенги [41]. Засоленные щелочные и оторфованные кислые почвы в отличие от дельт рек, впадающих в северные и южные моря, широкого распространения в современной дельте не имеют.

Элементный состав гуминовых кислот. Элементный состав ГК, представленный в атомных процентах (табл. 2), по сравнению с почвами других территорий [12, 42, 43] характеризуется пониженным содержанием углерода и несколько повышенным – водорода и кислорода. Закономерное возрастание содержания углерода и снижение количества водорода в исследуемых ГК при переходе от луговых солончаковатых к луговым почвам объясняется нарастанием степени конденсированности, что соответствует экологическим условиям почвообразования и степени гидроморфности. Показатель Н/С является климатогенно обусловленным, имеющим свои пределы при разном сочетании теплообеспеченности и увлажнённости, его значения специфичны для почв Западной Сибири, Горного Алтая, Урала и Поволжья [43].

Отношение Н/С уменьшается от луговой к солончаковатой почве, что служит доказательством медленного увеличения обуглероженности ГК и снижения степени их гидрогенезации.

Таблица 2 [Table 2]

Элементный состав гуминовых кислот и степень их окисленности в аллювиальных почвах дельты р. Селенги
[Elemental composition of humic acids and their oxidation degree in Fluvisols of the Selenga River delta]

Почва [Soil]	Атомные, % [Atomic, %]				Атомные отношения [Atomic relations]			ω*
	С	Н	Н	О	Н/С	О/С	С/Н	
Аллювиальная луговая (n=5) [Mollic Fluvisols]	43,8 ±0,7	32,3 ±0,3	2,4 ±0,2	21,1 ±0,3	0,7	0,4	17,9	0,2
Аллювиальная лугово-болотная (n=5) [Gleyic Fluvisols]	41,1 ±0,1	33,9 ±0,1	2,2 ±0,1	22,6 ±0,3	0,8	0,5	18,7	0,3
Аллювиальная солончаковатая (n=5) [Mollic Fluvisols (Salic)]	37,4 ±0,5	35,0 ±0,4	2,6 ±0,1	25,0 ±0,4	0,9	0,7	14,4	0,4

* Степень окисленности [Degree of oxidation].

Отношение С/Н, свидетельствующее об обогащенности ОВ азотом, в изученных препаратах ГК сужается в луговой солончаковатой почве, что является результатом особых условий гумусообразования, связанных с засолением. В них снижаются уровень потенциального плодородия и доступность макро- и микроэлементов для растений, а также ухудшаются водно-физические свойства почв. ГК из гумусово-аккумулятивного горизонта данных почв обогащены не только азотом, здесь же и самая высокая доля водорода, что свидетельствует об относительной незрелости этих кислот и значительном участии периферических фрагментов в их структуре.

ГК из аллювиальных лугово-болотных почв менее обогащены азотом, чем ГК аллювиальных луговых почв, при этом они более гидрогенизированы и несколько более окислены, что на фоне уменьшения содержания углерода свидетельствует о большей развитости периферической части молекул. Между тем нельзя делать вывод о развитии именно алифатических компонентов, так как данные элементного состава указывают на преобладание углеводных, алкильных и полисахаридных фрагментов. Повышенная степень окисленности ГК также свидетельствует о развитии периферических, в основном карбоксильных групп. В целом установленные уровни содержания углерода и азота в составе ГК исследуемых почв близки к средним показателям ГК почв различных природных зон, определенным для выборок большого объема [16, 44].

Структурный состав ГК. Для оценки связи между элементным составом и структурными особенностями ГК нами проанализированы спектры ^{13}C -ЯМР препаратов ГК исследуемых почв (рис. 2), идентифицированы следующие области: алифатическая (0–95 ppm), ароматическая (95–165 ppm), области карбоксилов, эфиров и амидов (эти функциональные группы могут быть связаны как с алифатической, так и с ароматической компонентой ГК) (165–185 ppm) и карбонилы (185–200 ppm), что свидетельствует о большой сложности строения ГК и полифункциональных свойствах, обуславливающих их активное участие в почвенных процессах.

Оценка относительного содержания атомов углерода основных функциональных групп и структурных фрагментов в препаратах ГК аллювиальных почв проведена нами интегрированием линий поглощения в соответствующих диапазонах химических сдвигов (табл. 3).

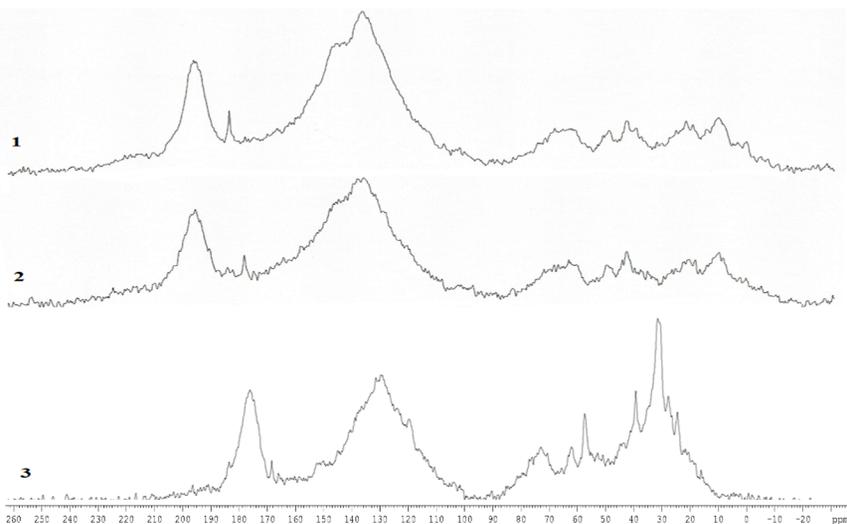


Рис. 2. Спектры ^{13}C -ЯМР гуминовых кислот: 1 – аллювиальная луговая; 2 – аллювиальная лугово-болотная; 3 – аллювиальная луговая солончаковатая

[Fig. 2. ^{13}C -NMR spectra of humic acids: 1 - Mollic Fluvisols; 2 - Gleyic Fluvisols; 3 - Mollic Fluvisols (Salic)]

В алифатической области во всех спектрах ГК присутствуют CH_2 -алкильные фрагменты, сосредоточенные в области 30–50 ppm и характеризующиеся наибольшей устойчивостью к трансформации среди алифатических компонентов. Считается, что высокая доля атомов алифатических фрагментов связана с накоплением продуктов растительного происхождения – воско-мол, гликолипидов, кутина, жирных кислот [45]. В ГК луговых солончаковатых почв он наиболее выражен, скорее всего из-за объема и состава органических остатков, так и специфическими биохимическими условиями их разложения.

Во всех спектрах ГК присутствуют отчетливые пики в диапазоне 45–65 ppm, данный диапазон связан с метоксильными группами, обусловленными присутствием лигниновых и аминокислотных фрагментов [46]. Сильные сигналы в области 65–95 ppm относятся к углероду $\text{CH}(\text{OH})$ групп и принадлежат к целлюлозным или другим углеводным фрагментам [47].

Таблица 3 [Table 3]

Содержание структурных фрагментов гуминовых кислот аллювиальных почв дельты р. Селенги по данным ЯМР ^{13}C , %
[Content of structural fragments of humic acids in Fluvisols of the Selenga River delta according to ^{13}C NMR data, %]

Почва [Soil]	Химический сдвиг, ppm [Chemical shift]						AR/AL	fa, %
	0–45	45–65	65–95	95–165	165–185	185–200		
Аллювиальная луговая [Mollic Fluvisols]	12,3	6,5	8,5	55,1	15,5	2,1	2,0	66,9
Аллювиальная лугово-болотная [Gleyic Fluvisols]	12,6	8,4	8,1	53,7	17,2		1,8	64,8
Аллювиальная луговая солончаковатая [Mollic Fluvisols (Salic)]	28,5	16,9		39,3	13,3	2,0	0,9	41,3

Примечание. AR/AL – сигналы от ^{13}C ароматических структур (AR) суммированы по областям 165–95 ppm, алифатических структур (AL) – 95–0 ppm [Signals from ^{13}C aromatic structures (AR) were summarized in the 165-95 ppm region and aliphatic structures (AL) in the 95-0 ppm region]; fa – степень ароматичности [Degree of aromaticity].

В области ароматических фрагментов наиболее широкие пики приходятся на C, H-замещенные ароматические фрагменты (110–130 ppm), что характерно в большей степени для почв под луговой растительностью. Пики при 147–149 ppm (область резонирования связей ароматической природы) обусловлены соединениями лигнинового происхождения [48], такие пики скорее всего обусловлены высоким содержанием целлюлозолигнинового комплекса в растительности Забайкалья [49]. ЯМР-спектры ГК аллювиальной луговой почвы имели более интенсивные сигналы в этой области по сравнению с луговой солончаковатой почвой.

В области 172–174 ppm, присутствует сигнал, относимый к углероду карбоксильных групп; он также может принадлежать и карбонил группе

амидов и полипептидов [50]. Атомы углерода хинонных фрагментов и карбонильных групп альдегидов и кетонов вносят свой вклад в слабые сигналы в области 185–200 ppm; незначительное их содержание, вероятно, связано с невысокой скоростью разложения органического вещества в этих почвах в результате неблагоприятных водно-физических условий (переувлажнение), которые снижают активность почвенных микроорганизмов. Засоление также отрицательно влияет на многие почвенные организмы, ограничивая доступность воды в результате низкого осмотического потенциала в почве и ионной токсичности [51].

Полученные данные о составе ГК позволяют заключить, что изменения элементного состава сопровождаются изменениями состава и структурных особенностей гуминовых кислот. В целом ГК аллювиальной луговой почвы более обогащена ароматическими фрагментами, чем ГК лугово-болотных и луговых солончаковых почв. Она представляет собой более «зрелый» продукт гумификации. Для сравнения степени ароматичности (fa) структурных фрагментов ГК аллювиальных почв было использовано соотношение углерода ароматических структур к углероду алифатических цепей AR (165–95 ppm)/AL (95–0 ppm), которое отражает гидрофобно-гидрофильный баланс в ГК. Данное соотношение увеличилось более чем в два раза при переходе от аллювиальной луговой солончаковой к аллювиальной луговой. Меньшая степень ароматичности у препарата ГК луговой солончаковой почвы, что также подтверждает значения Н/С полученные по данным элементного состава, и указывает на большее содержание в нем менее разложенных гидрофильных структур (в первую очередь целлюлозных остатков).

Заключение

Формирование в поймах р. Селенги аллювиальных почв с разным содержанием С, Н, О, N и с различными функциональными группами в гуминовых кислотах обусловлено биоклиматическими условиями, связанными с длительным нахождением их в мерзлотном состоянии, режимом грунтовых вод, составом отложений, видовым составом растений. Несколько большая степень ароматичности в аллювиальной луговой и лугово-болотной почве связана с экологическими условиями и химическим составом предшественников гумификации. Возрастание доли алифатических структур и снижение доли ароматических фрагментов в составе препаратов ГК луговой солончаковой почвы позволяют говорить об упрощении строения гуминовой кислоты. Грунтовое увлажнение в совокупности с засолением заметно снижает скорость трансформации почвенного ОВ и приводит к увеличению доли неокисленных алифатических фрагментов. Значительная доля реакционно способных функциональных групп в составе ГК придает почвам высокую адсорбционную способность и является определяющим фактором при рассмотрении их в качестве биогеохимических природных барьеров в дельте.

Список источников

1. Martin M.V., Gebuhr C., Daniel O., Wiltshire K.H. Characterization of a humic acid extracted from marine sediment and its influence on the growth of marine diatoms // *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*. 2014. Vol. 94 (5). PP. 895–906. doi: 10.1017/S0025315414000368
2. Fernandes A.N., Giovanela M., Esteves V.I. Elemental and spectral properties of peat and soil samples and their respective humic substances // *J. Mol. Str.* 2010. Vol. 971. PP. 33–38. doi: 10.1016/j.molstruc.2010.02.069
3. Nebbioso A., Piccolo A. Molecular characterization of dissolved organic matter (DOM): a critical review // *Anal. Bioanal. Chem.* 2013. Vol. 405. PP. 109–124. doi: 10.1007/s00216-012-6363-2
4. Schaeffer A., Nannipieri P., Kästner M. et al. From humic substances to soil organic matter–microbial contributions. In honour of Konrad Haider and James P. Martin for their outstanding research contribution to soil science // *J Soils Sediments*. 2015. Vol. 15. PP. 1865–1881. doi: 10.1007/s11368-015-1177-4
5. Hayes M.H.B., Swift R.S. An appreciation of the contribution of Frank Stevenson to the advancement of studies of soil organic matter and humic substances // *J Soils Sediments*. 2018. Vol. 18. PP. 1212–1231. doi: 10.1007/s11368-016-1636-6
6. Kleber M., Lehmann J. Humic substances extracted by alkali are invalid proxies for the dynamics and functions of organic matter in terrestrial and aquatic ecosystems // *J. Environ. Qual.* 2019. Vol. 48. PP. 207–216. doi: 10.2134/jeq2019.01.0036
7. Dou S., Shan J., Song X., Cao R., Wu M., Li C., Guan S. Are humic substances soil microbial residues or unique synthesized compounds? A perspective on their distinctiveness // *Pedosphere*. 2020. Vol. 30(2). PP. 159–167. doi: 10.1016/S1002-0160(20)60001-7
8. Nobili M., Bravo C., Chen Y. The spontaneous secondary synthesis of soil organic matter components: a critical examination of the soil continuum model theory // *Appl. Soil Ecol.* 2020. Vol. 154. p. 103655. doi: 10.1016/j.apsoil.2020.103655
9. Simpson A.J., Kingery W.L., Hayes M.H., Spraul M., Humpfer E., Dvortsak P., Kersbaum R., Godejohann M., Hofmann M. Molecular structures and associations of humic substances in the terrestrial environment // *Naturwissenschaften*. 2002. Vol. 89. PP. 84–88. doi: 10.1007/s00114-001-0293-8
10. Lehmann J., Kleber M. The contentious nature of soil organic matter // *Nature*. 2015. Vol. 528. PP. 60–68. doi: 10.1038/nature16069
11. Rigobello E.S., Dantas A.D.B., Di Bernardo L., Vieira E.M. Influence of the apparent molecular size of aquatic humic substances on colour removal by coagulation and filtration // *Environmental Technology*. 2011. Vol. 32. PP. 1767–1777. doi: 10.1080/09593330.2011.555423
12. Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М. : Изд-во МГУ, 1990. 324 с.
13. Дергачева М.И. Методы почвоведения в археологических исследованиях. Новосибирск : Новосибирский гос. ун-т, 2007. 96 с.
14. Hatcher P.G., Dria K.J., Kim S., Frazier S.W. Modern analytical studies of humic substances // *Soil Sci.* 2001. Vol. 166. PP. 770–794. doi: 10.1097/00010694-200111000-00005
15. Leenheer J.A. Systematic approaches to comprehensive analyses of natural organic matter // *Ann. Environ. Sci.* 2009. Vol. 3. PP. 1–130.
16. Stevenson F.J. Humus chemistry: genesis, composition, reactions. New York : John Wiley and Sons, 1994. 512 p.
17. Claridge T.D.W. High-resolution NMR techniques in organic chemistry. Amsterdam : Elsevier Ltd., 2016. 541 p.
18. Hedges J.I., Eglinton G., Hatcher P.G., Kirchman D.L., Arnosti C., Derenne S., Evershed R.P., Kögel-Knabner I., De Leeuw J.W., Littke R., Michaelis W., Rullkotter J. The molecularly-uncharacterized component of nonliving organic matter in natural environments // *Org. Geochem.* 2000. Vol. 31. PP. 945–958. doi: 10.1016/S0146-6380(00)00096-6

19. Калабин Г.А., Каницкая Л.В., Кушнарев Д.Ф. Количественная спектроскопия ЯМР природного органического сырья и продуктов его переработки. М. : Химия, 2000. 408 с.
20. Чуков С.Н. Структурно-функциональные параметры органического вещества почв в условиях антропогенного воздействия. СПб. : Изд-во СПбГУ, 2001. 216 с.
21. Mao J., Cao X., Oik D.C., Chu W., Schmidt-Rohr K. Advanced solid-state NMR spectroscopy of natural organic matter // *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*. 2017. Vol. 100. PP. 17–51. doi: 10.1016/j.pnmrs.2016.11.003
22. Чуков С.Н., Лодыгин Е.Д., Абакумов Е.В. Использование ¹³C ЯМР-спектроскопии в исследовании органического вещества почв (обзор) // *Почвоведение*. 2018. № 8. С. 952–964.
23. Kogel-Knabner I., Rumpel C. Advances in Molecular Approaches for Understanding Soil Organic Matter Composition, Origin, and Turnover: A Historical Overview // *Adv. Agron*. 2018. Vol. 149. PP. 1–48. doi: 10.1016/bs.agron.2018.01.003
24. Гынинова А.Б., Корсунов В.М. Почвы Селенгинского дельтового района Прибайкалья // *Почвоведение*. 2006. № 3. С. 273–281.
25. Макушкин Э.О. Сравнительная оценка гумусного состояния почв пастбищ и фоновых участков дельты р. Селенга // *Агрохимия*. 2015. № 12. С. 28–36
26. Макушкин Э.О., Сорокин Н.Д., Корсунов В.М. Состояние микробных сообществ почв в различных условиях их поемности в дельте Селенги. Улан-Удэ : Изд-во БНЦ СО РАН, 2007. 160 с.
27. Сорокин Н.Д., Макушкин Э.О., Корсунов В.М., Афанасова Е.Н., Шахматова Е.Ю. Микробные комплексы гидроморфных почв дельты Селенги (Байкальский регион) // *Почвоведение*. 2006. № 7. С. 855–860.
28. Шахматова Е.Ю., Макушкин Э.О., Корсунов В.М. Особенности химического состава почвенно-грунтовых вод пойменных почв дельты Селенги (Байкальский регион) // *Почвоведение*. 2009. № 6. С. 674–679.
29. Polyakov V., Abakumov E., Lodygin E., Vasilevich R., Lapidus A. Distribution of Molecular Weight of Humic Substances Isolated from Soils of Tallgrass Temperate Rainforests (Chernevaya Taiga) // *Agronomy*. 2022. Vol. 12 (8). P. 1760. doi: 10.3390/agronomy12081760
30. Abakumov E.V., Polyakov V.I., Chukov S.N. Approaches and Methods for Studying Soil Organic Matter in the Carbon Polygons of Russia (Review) // *Eurasian Soil Science*. 2022. Vol. 55 (7). PP. 849–860. doi: 10.1134/S106422932207002X
31. Lodygin E., Abakumov E. The Impact of Agricultural Use of Retisols on the Molecular Structure of Humic Substances // *Agronomy*. 2022. Vol. 12 (1). P. 144. doi: 10.3390/agronomy12010144
32. Polyakov V., Loiko S., Istigechev G., Lapidus A., Abakumov E. Elemental and molecular composition of humic acids isolated from soils of tallgrass temperate rainforests (Chernevaya taiga) by ¹H-¹³C HECTCOR NMR spectroscopy // *Agronomy*. 2021. Vol. 11 (10). P. 1998. doi: 10.3390/agronomy11101998
33. Polyakov V.I., Chegodaeva N.A., Abakumov E.V. Molecular and elemental composition of humic acids isolated from selected soils of the Russian Arctic // *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta, Biologiya*. 2019. Vol. 47. PP. 6–21. doi: 10.17223/19988591/47/1
34. Chalov S., Thorslund J., Kasimo N., Aybullatov D., Ilyicheva E., Karthe D., Kositsky A., Lychagin M., Nittrouer J., Pavlov M., Pietron J., Shinkareva G., Tarasov M., Garmaev E., Akhtman Y., Jarsjo E. The Selenga River delta: a geochemical barrier protecting Lake Baikal waters // *Regional Environmental Change*. 2016. PP. 1–15.
35. Жуков В. М. Климат Бурятской АССР. Улан-Удэ : Бурят. кн. изд-во, 1960. 188 с.
36. Гынинова А.Б., Шоба С.А., Балсанова Л.Д., Гынинова Б.Д. Почвы дельты реки Селенги (генезис, география, геохимия). Улан-Удэ : Изд-во БНЦ СО РАН, 2012. 344 с.

37. IUSS Working Group WRB World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. World Soil Resources Reports No. 106. Rome: FAO, 2015. 192 p.
38. Агрохимические методы исследования почв. М. : Наука, 1975. 656 с.
39. Орлов Д.С., Гришина Л.А. Практикум по химии гумуса. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1981. 273 с.
40. Orlov D.S. Humic Substances of Soils and General Theory of Humification. 1st ed. London, UK : Taylor & Francis, 1995. 325p.
41. Убугунова В. И., Убугунов Л.Л., Корсунов В.М., Балабко П.Н. Аллювиальные почвы речных долин бассейна р. Селенги. Улан-Удэ : Изд-во БНЦ СО РАН, 1998. 290 с.
42. Кленов Б.М. Устойчивость гумуса автоморфных почв Западной Сибири. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2000. 173 с.
43. Дергачева М.И., Некрасова О.А., Оконешникова М.В., Васильева Д.И., Гаврилов Д.А., Очур К.О., Ондар Е.Э. Соотношение элементов в гуминовых кислотах как источник информации о природной среде формирования почв // Сибирский экологический журнал. 2012. № 5. С. 643–647.
44. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И. Органическое вещество почв Российской Федерации. М. : Наука, 1996. 256 с.
45. Winkler A., Haumaier L., Zech W. Insoluble alkyl carbon components in soils derive mainly from cutin and suberin // Org. Geochem. 2005. Vol. 36 (4). PP. 519–529. doi: 10.1016/j.orggeochem.2004.11.006
46. Knicker H., Hilscher A., González-Vila F.J., Almendros G. A new conceptual model for the structural properties of char produced during vegetation fires // Org. Geochem. 2008. Vol. 39(8). PP. 935–939. doi: 10.1016/j.org-geochem.2008.03.021
47. Simpson A.J., Simpson M.J. Nuclear magnetic resonance analysis of natural organic matter. Biophysico-chemical processes involving natural nonliving organic matter in environmental systems / eds. by N. Senesi, B. Xing, P.M. Huang. New Jersey : John Wiley & Sons Inc., 2009. PP. 589–650.
48. Ковалева Н.О., Ковалев И.В. Лигниновые фенолы в почвах как биомаркеры палеораствительности // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1073–1086. doi: 10.7868/S0032180X15(090063
49. Чимитдоржиева Г.Д. Особенности органического вещества криогенных почв // Почвоведение. 1991. № 11. С. 125.
50. 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
51. Ибраева М.А., Шаухарова Д.Е., Джуманова М. Влияние засоления почв на микробиологическую активность // Почвоведение и агрохимия. 2020. № 2. С. 71–78.

References

1. Martin MV, Gebuhr C, Daniel O, Wiltshire KH. Characterization of a humic acid extracted from marine sediment and its influence on the growth of marine diatoms. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*. 2014;94(5):895-906. doi: 10.1017/S0025315414000368
2. Fernandes AN, Giovanela M, Esteves VI. Elemental and spectral properties of peat and soil samples and their respective humic substances. *J. Mol. Str.* 2010;971:33-38. doi: 10.1016/j.molstruc.2010.02.069
3. Nebbioso A, Piccolo A. Molecular characterization of dissolved organic matter (DOM): a critical review. *Anal. Bioanal. Chem.* 2013;405:109-124. doi: 10.1007/s00216-012-6363-2
4. Schaeffer A, Nannipieri P, Kästner M. et al. From humic substances to soil organic matter–microbial contributions. In honour of Konrad Haider and James P. Martin for their outstanding research contribution to soil science. *J Soils Sediments*. 2015;15:1865-1881. doi: 10.1007/s11368-015-1177-4

5. Hayes MHB, Swift RS. An appreciation of the contribution of Frank Stevenson to the advancement of studies of soil organic matter and humic substances. *J Soils Sediments*. 2018;18:1212-1231. doi: 10.1007/s11368-016-1636-6
6. Kleber M, Lehmann J. Humic substances extracted by alkali are invalid proxies for the dynamics and functions of organic matter in terrestrial and aquatic ecosystems. *J. Environ. Qual.* 2019;48:207-216. doi: 10.2134/jeq2019.01.0036
7. Dou S, Shan J, Song X, Cao R, Wu M, Li C, Guan S. Are humic substances soil microbial residues or unique synthesized compounds? A perspective on their distinctiveness. *Pedosphere*. 2020;30(2):159-167. doi: 10.1016/S1002-0160(20)60001-7
8. Nobili M, Bravo C, Chen Y. The spontaneous secondary synthesis of soil organic matter components: a critical examination of the soil continuum model theory. *Appl. Soil Ecol.* 2020;154:103655. doi: 10.1016/j.apsoil.2020.103655
9. Simpson AJ, Kingery WL, Hayes MH, Spraul M, Humpfer E, Dvortsak P, Kerssebaum R, Godejohann M, Hofmann M. Molecular structures and associations of humic substances in the terrestrial environment. *Naturwissenschaften*. 2002;89:84-88. doi: 10.1007/s00114-001-0293-8
10. Lehmann J, Kleber M. The contentious nature of soil organic matter. *Nature*. 2015;528:60-68. doi: 10.1038/nature16069
11. Rigobello ES, Dantas ADB, Di Bernardo L, Vieira EM. Influence of the apparent molecular size of aquatic humic substances on colour removal by coagulation and filtration. *Environmental Technology*. 2011;32:1767-1777. doi: 10.1080/09593330.2011.555423
12. Orlov DS. Gumusovye kisloty pochv i obshchaya teoriya gumifikatsii [Soil humic acids and the general theory of humification]. Moscow: MGU Publ.; 1990. 324 p. In Russian
13. Dergacheva MI. Metody pochvovedeniya v arkhologicheskikh issledovaniyakh [Methods of soil science in archaeological research]. Novosibirsk: Novosibirskiy gos. un-t Publ.; 2007. 96 p. In Russian
14. Hatcher PG, Dria KJ, Kim S, Frazier SW. Modern analytical studies of humic substances. *Soil Sci*. 2001;166:770-794. doi: 10.1097/00010694-200111000-00005
15. Leenheer JA. Systematic approaches to comprehensive analyses of natural organic matter. *Ann. Environ. Sci.* 2009;3:1-130.
16. Stevenson FJ. Humus chemistry: genesis, composition, reactions. New York: John Wiley and Sons; 1994. 512 p.
17. Claridge TDW. High-resolution NMR techniques in organic chemistry. Amsterdam: Elsevier Ltd.; 2016. 541 p.
18. Hedges JI, Eglinton G, Hatcher PG, Kirchman DL, Arnosti C, Derenne S, Evershed RP., Kögel-Knabner I, De Leeuw JW, Littke R, Michaelis W, Rullkotter J. The molecularly-uncharacterized component of nonliving organic matter in natural environments. *Org. Geochem*. 2000;31:945-958. doi: 10.1016/S0146-6380(00)00096-6
19. Kalabin GA, Kanitskaya LV, Kushnarev DF. Kolichestvennaya spektroskopiya YaMR prirodnogo organicheskogo syr'ya i produktov ego pererabotki [Quantitative NMR spectroscopy of natural organic raw materials and products of their processing]. Moscow: Khimiya Publ.; 2000. 408 p. In Russian
20. Chukov SN. Strukturno-funktsional'nye parametry organicheskogo veshchestva pochv v usloviyakh antropogennogo vozdeystviya [Structural and functional parameters of soil organic matter under anthropogenic impact]. Saint Petersburg: SPbGU Publ.; 2001. 216 p. In Russian
21. Mao J, Cao X, Olk DC, Chu W, Schmidt-Rohr K. Advanced solid-state NMR spectroscopy of natural organic matter // *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*. 2017;100:17-51. doi: 10.1016/j.pnmrs.2016.11.003
22. Chukov SN, Lodygin ED, Abakumov EV. Application of ¹³C NMR spectroscopy to the study of soil organic matter: A review of publications. *Eurasian Soil Science*. 2018;51(8):889-900.
23. Kogel-Knabner I, Rumpel C, Advances in Molecular Approaches for Understanding Soil Organic Matter Composition, Origin, and Turnover: A Historical Overview. *Adv. Agron*. 2018;149:1-48. doi: 10.1016/bs.agron.2018.01.003

24. Gyninova AB, Korsunov VM. The soil cover of the Selenga delta area in the Baikal region. *Eurasian Soil Science*. 2006;39(3):243-250.
25. Makushkin EO. The Comparative Estimation of the Humus State of Soils on Pascual and Base-Line Areal of Selenga River Delta. *Agrochemistry*. 2015;12:28-36.
26. Makushkin EO., Sorokin ND, Korsunov VM. Sostoyaniye mikrobynykh soobshchestv pochv v razlichnykh usloviyakh ih poemnosti v del'te Selengi. Ulan-Ude: BNC SO RAN Publ., 2007. 160 p. In Russian
27. Sorokin ND, Afanasova EN, Makushkin EO, Korsunov VM., Shakhmatova E.Yu. Microbial complexes of hydromorphic soils in the Selenga River delta (Baikal region). *Eurasian Soil Science*. 2006;(39)7:765-770.
28. Shakhmatova EYu, Makushkin EO, Korsunov VM. Specific features of the chemical composition of groundwater in floodplain soils of the Selenga River delta (lake Baikal region). *Eurasian Soil Science*. 2009;(42)6:623-628.
29. Polyakov V, Abakumov E, Lodygin E, Vasilevich R, Lapidus A. Distribution of Molecular Weight of Humic Substances Isolated from Soils of Tallgrass Temperate Rainforests (Chernevaya Taiga). *Agronomy*. 2022;12(8):1760. doi: 10.3390/agronomy12081760
30. Abakumov EV, Polyakov VI, Chukov SN. Approaches and Methods for Studying Soil Organic Matter in the Carbon Polygons of Russia (Review). *Eurasian Soil Science*. 2022;55(7):849-860. doi: 10.1134/S106422932207002X
31. Lodygin E, Abakumov E. The Impact of Agricultural Use of Retisols on the Molecular Structure of Humic Substances // *Agronomy*. 2022;12(1):144. doi: 10.3390/agronomy12010144
32. Polyakov V, Loiko S, Istigechev G, Lapidus A, Abakumov E. Elemental and molecular composition of humic acids isolated from soils of tallgrass temperate rainforests (Chernevaya taiga) by ¹H-¹³C HECTCOR NMR spectroscopy // *Agronomy*. 2021. 11(10), 1998. doi: 10.3390/agronomy11101998
33. Polyakov VI, Chegodaeva NA, Abakumov EV. Molecular and elemental composition of humic acids isolated from selected soils of the Russian Arctic. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Biologiya*. 2019;47:6-21. doi: 10.17223/19988591/47/1
34. Chalov S, Thorslund J, Kasimo N, Aybullatov D, Ilyicheva E, Karthe D, Kositsky A, Ly-chagin M, Nittrouer J, Pavlov M, Pietron J, Shinkareva G, Tarasov M, Garmaev E, Akhtman Y, Jarsjo E. The Selenga River delta: a geochemical barrier protecting Lake Baikal waters. *Regional Environmental Change*. 2016;1-15.
35. Zhukov VM. Klimat Buryatskoy ASSR [The climate of the Buryat ASSR]. Ulan-Ude: Buryat. kn. Publ.; 1960. 188 p. In Russian
36. Gyninova AB, Shoba SA, Balsanova LD, Gyninova BD. Pochvy del'ty reki Selengi (genesis, geografiya, geokhimiya) [Soils of the Selenga River Delta (genesis, geography, geochemistry)]. Ulan-Ude: BNTs SO RAN Publ.; 2012. 344 p. In Russian
37. IUSS Working Group WRB World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. World Soil Resources Reports No. 106. Rome: FAO; 2015. 192 p.
38. Agrohimicheskie metody issledovaniya pochv. M.: Nauka Publ., 1975. 656 p. In Russian
39. Orlov D, Grishina LA. Praktikum po khimii gumusa [Workshop on chemistry of humus]. Moscow: Mosk. un-t Publ.; 1981. 273 p. In Russian
40. Orlov DS. Humic Substances of Soils and General Theory of Humification, 1st ed.; Taylor & Francis: London, UK, 1995; 325 p.
41. Ubugunova VI, Ubugunov LL, Korsunov VM, Balabko PN. Allyuvial'nye pochvy rechnykh dolin basseyna r. Selengi [Alluvial soils of river valleys in the Selenga River Basin]. Ulan-Ude: BNTs SO RAN Publ.; 1998. 290 p. In Russian
42. Klenov BM. Ustoychivost' gumusa avtomorfnykh pochv Zapadnoy Sibiri [Stability of humus of automorphic soils of Western Siberia]. Novosibirsk: SO RAN Publ.; 2000. 173 p. In Russian
43. Dergacheva MI, Nekrasova OA, Okoneshnikova MV, Vasil'yeva DI, Gavrilov DA, Ochur KO, Ondar YeE. Sootnosheniye elementov v guminovykh kislotakh kak istochnik pochvy o prirodnoy srede obrazuyushchey pochvu [Ratio of elements in humic acids as a source of information on environment formation soil]. *Siberian Ecological Journal*. 2012;5:643-647.

44. Orlov DS, Biryukova ON, Sukhanova NI. Organicheskoye veshchestvo pochv Rossiyskoy Federatsii [Organic matter of soils of the Russian Federation]. M.: Nauka Publ., 1996. 256 p.
45. Winkler A, Haumaier L, Zech W. Insoluble alkyl carbon components in soils derive mainly from cutin and suberin. *Org. Geochem.* 2005;36(4):519-529. doi: 10.1016/j.orggeochem.2004.11.006
46. Knicker H, Hilscher A, González-Vila FJ, Almendros G. A new conceptual model for the structural properties of char produced during vegetation fires. *Org. Geochem.* 2008;39(8):935-939. doi: 10.1016/j.org-geochem.2008.03.021
47. Simpson AJ, Simpson MJ. Nuclear magnetic resonance analysis of natural organic matter. Biophysico-chemical processes involving natural nonliving organic matter in environmental systems / Eds.: N. Senesi, B. Xing, P.M. Huang. John Wiley & Sons Inc. New Jersey, 2009. PP. 589-650.
48. Kovaleva NO, Kovalev IV. Lignin phenols in soils as biomarkers of paleovegetation. *Eurasian Soil Science.* 2015;48:946-958. doi: 10.1134/S1064229315090057
49. Chimitdorzhieva GD. P articular qualities of organic matter in cryogenic soils. *Eurasian Soil Science.* 1991;11:125.
50. Lodygin ED, Beznosikov VA, Vasilevich RS. Molecular composition of humic substances in tundra soils (¹³C-NMR spectroscopic study). *Eurasian Soil Science.* 2014;47:400-406. doi 10.1134/S1064229314010074
51. Ibraeva MA, Shaukharova DE, Dzhumanova M. Effect of soil salinity on microbiological activity. *Eurasian Soil Science and Agrochemistry.* 2020;2:71-78.

Информация об авторах:

Мильхеев Евгений Юрьевич – канд. биол. наук, н.с. лаборатории биохимии почв, Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН (Улан-Удэ, Россия)
E-mail: evg-milh@rambler.ru

Чимитдоржиева Галина Доржиевна – д-р с.-х. наук, профессор, в.н.с. лаборатории биохимии почв, Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН (Улан-Удэ, Россия)
E-mail: galdorj@gmail.com

Балданов Нимбу Доржижапович – канд. биол. наук, доцент, зав. кафедрой мелиорации и охраны земель, Бурятская государственная сельскохозяйственная академия имени В.Р. Филиппова (Улан-Удэ, Россия).
E-mail: nimbu_bald@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Evgeniy Yr. Milkheev, Cand. Sci. (Biol), Researcher, Laboratory of Soil Biochemistry, Institute of General and Experimental Biology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Ulan-Ude, Russian Federation).
E-mail: evg-milh@rambler.ru

Galina D. Chimitdorzhieva, Dr. Sci. (Agr.), Professor, Leading Researcher, Laboratory of Soil Biochemistry, Institute of General and Experimental Biology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Ulan-Ude, Russian Federation).
E-mail: galdorj@gmail.com

Nimbu D. Baldanov, Cand. Sci. (Biol.), Head. Department of Land Reclamation and Protection, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippova (Ulan-Ude, Russian Federation).
E-mail: nimbu_bald@mail.ru

The Authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 28.05.2022;
одобрена после рецензирования 09.10.2023; принята к публикации 11.12.2023.*

*The article was submitted 28.05.2022;
approved after reviewing 09.10.2023; accepted for publication 11.12.2023.*