

УДК 631.42

МОЛЕКУЛЯРНАЯ СТРУКТУРА ГУМИНОВЫХ КИСЛОТ
КАШТАНОВЫХ ПОЧВ ЗАБАЙКАЛЬЯ

© 2025 г. Е.Ю. Мильхеев*, Э.В. Цыбикова**

*Институт общей и экспериментальной биологии Сибирского отделения РАН
Россия, 67004, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6. E-mail: evg-milh@rambler.ru

**Бурятская государственная сельскохозяйственная академия имени В.Р. Филиппова
Россия, 670010, г. Улан-Удэ, ул. Пушкина, д. 8

Поступила в редакцию 14.10.2024. После доработки 28.01.2025. Принята к публикации 01.03.2025.

Биоклиматические условия почвообразования в зоне криоаридного климата Западного Забайкалья определяют специфический состав гуминовых веществ, однако гетерогенность этих соединений, а также широко используемые классические методы анализа органического вещества не позволяют с достаточной уверенностью судить о структуре высокомолекулярных органических соединений в почвах. Спектроскопия ¹³C-ЯМР препаратов гуминовых кислот каштановых почв позволила выделить диапазоны химических сдвигов, принадлежащих атомам углерода различных функциональных групп и молекулярных фрагментов. Особенность процесса гумусообразования каштановых почв проявляется в том, что, несмотря на жесткие условия почвообразования (влияние длительной сезонной мерзлоты, континентальность климата), образуются гуминовые кислоты с довольно высоким содержанием С, N и O. Макромолекулы гуминовых кислот в пахотных образцах каштановых почв характеризуются менее развитой периферической частью, высокой степенью бензоидности по сравнению с гуминовыми кислотами целинного варианта, что обусловлено экологическими условиями почвообразования и компонентным составом предшественников гумификации. Возрастание доли алифатических структур и снижение доли ароматических фрагментов позволяют говорить об упрощении строения макромолекул гуминовой кислоты. Короткий вегетационный период, недостаточное увлажнение в совокупности с легким гранулометрическим составом заметно снижают скорость трансформации органического вещества и приводят к увеличению доли неокисленных алифатических фрагментов.

Ключевые слова: почвенное органическое вещество, элементный состав, ЯМР-спектроскопия, криоаридные каштановые почвы, Западное Забайкалье.

DOI: 10.24412/1993-3916-2025-2-53-60

EDN: JGUGBG

Почвенное органическое вещество (ПОВ) является основным компонентом глобального углеродного цикла и содержит больше углерода, чем растительная биомасса и атмосфера вместе взятые (Patton et al., 2019). ПОВ выполняет множество экологических и природоохранных функций, таких как повышение плодородия почвы, улучшение ее структуры, продуктивности и устойчивости экосистем (Gerke, 2018). Кроме того, ПОВ может выступать как поглотитель или источник CO₂ в зависимости от конкретного землепользования и переменных окружающей среды (Lal, 2004). Последние данные показывают, что физико-химическая природа ПОВ зависит от диагенетических условий, состава минеральной матрицы, поступления биомассы, практики землепользования, а также от численности и качества микрофлоры (Paul, 2016; Olk et al., 2019).

Поскольку именно специфический молекулярный состав гумусовых веществ (Piccolo, 2002) существенно влияет на динамику и запасы почвенного углерода (Woo et al., 2014), базальное дыхание почвы (Fang et al., 2005), а также взаимоотношения гумус-растение (Canellas, Olivares, 2014), приобретают особую значимость исследования состава и структуры этой органической фракции в почвах различного генезиса.

Анализ динамики ПОВ и его химически и биологически активных фракций, включая гуминовые кислоты (ГК), имеет основополагающее значение для оценки его уязвимости к изменениям

физических и химических свойств при воздействии различных погодных и антропогенных воздействий (Stevenson, 1994). Важным шагом к пониманию реакционной способности, свойств и функций ГК является определение их состава и функциональных групп, что чрезвычайно сложно из-за структурной неоднородности ПОВ.

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 (Kogel-Knabner, Rumpel, 2018). По сравнению с другими спектроскопическими методами твердофазная ^{13}C -ЯМР позволяет получить всестороннюю количественную и структурную информацию из ГК и, возможно, является одним из самых мощных методов для всесторонней характеристики сложных органических веществ (Mao et al., 2017; Чуков и др., 2018).

Южные котловины Забайкалья с каштановыми почвами являются самыми восточными на территории России и занимают почти 60% всех пахотных земель Бурятии. Здесь широкое распространение получили дефляционные процессы, обусловленные сухостью климата, мощной инсоляцией, малой лесистостью сельскохозяйственных территорий и большой распаханностью земель (Чимитдоржиева, 2019). Современное состояние почв сухостепной зоны в результате широкого развития эрозии (водной и ветровой), а также процессов засоления следует охарактеризовать как неудовлетворительное. Усиление деградации приводит к уничтожению собственно почвы как природного образования, создает существенные трудности для функционирования других компонентов экосистем и природной среды в целом.

В связи с этим целью настоящего исследования является изучение высокомолекулярных органических соединений, таких как ГК, выделенных из гумусового горизонта каштановых почв Западного Забайкалья, 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, что особенно актуально для криоаридных степей с укороченным гумусовым профилем.

Материалы и методы

Ареал каштановых почв («Kastanozems» – по WRB, 2022) на высоких равнинах Гусиноозерской, Удинской и Иволгинской котловин представляет собой северный форпост Центрально-Азиатского пустынно-степного массива. Здесь под сухостепной растительностью в условиях резко-континентального климата под влиянием длительной сезонной мерзлоты и ограниченного количества осадков (180-250 мм/год) формируются каштановые почвы легкого гранулометрического состава (табл. 1), почти повсеместно подверженные дефляционным процессам. Сумма температур вегетационного периода составляет 1700-1800°C, длина безморозного периода – 106-116 дней. Средняя температура самого холодного месяца (января) составляет -27°C , самого теплого месяца (июль) – $+19^\circ\text{C}$. Однако по сравнению с другими зонами Бурятии эти территории считаются самыми благоприятными по тепловому балансу, хотя и наименее обеспеченными влагой. Дефицит влаги в сухих степях является основным фактором, лимитирующим биологическую активность и продуктивность экосистем.

Растительный покров забайкальских степей имеет своеобразную криоксерофильность: растения подушки, растения-куртинки, проникшие сюда аркоальпийские виды (астра альпийская, эдельвейс сибирский) наряду с сохранившимися доледниковыми реликтами (бересклет священный, ильм низкий). Эдификаторы сухой степи – полынь (холодная, Гмелина), тонконогий стройный, типчак ленский, осока твердоватая (Чимитдоржиева, Цыбикова, 2018).

Легкий гранулометрический состав каштановых почв и связанные с ним неблагоприятные водно-физические и физико-химические свойства характеризуют почвенный профиль сухостепной зоны, формирующийся и функционирующий в условиях жесткого гидрологического режима. Исследованиями Н.А. Ногиной (1964) и Ц.Х. Цыбжитова с соавторами (1999) показано, что каштановые почвы всегда отличаются небольшим диапазоном активной влаги. Во влажные годы вследствие песчаности и щебнистости грунта они глубоко промачиваются и вода уходит за пределы корнеобитаемого слоя. В средние по увлажнению годы вода глубоко не уходит и нижние горизонты каштановых почв на протяжении вегетационного периода остаются равномерно сухими.

Дефицит влаги каштановых почв является важным фактором, лимитирующим биологическую активность, трансформацию органического вещества, также эти почвы, быстро теряя влагу, легко распыляются и подвергаются ветровой дефляции в средней и сильной степени (Чимитдоржиева и др., 2019).

Таблица 1. Физико-химические показатели каштановых почв Западного Забайкалья (слой 0-20 см).

Почва	pH _{водн.}	C _{орг.} , %	N, %	Поглощенные основания		Физ. глина < 0.01 мм	Физ. песок > 0.01 мм
				Ca ²⁺	Mg ²⁺		
ГК1 (пашня)	6.8 ±0.17	0.80±0.02	0.09±0.01	9.9±0.12	4.5±0.09	17.7	82.3
ГК2 (целина)	7.1±0.21	1.05±0.05	0.10±0.02	13.5±0.09	3.8±0.04	12.5	87.5
ГК3 (целина)	7.3±0.19	0.96±0.07	0.07±0.01	12.5±0.14	3.6±0.08	10.4	89.6
ГК4 (пашня)	6.5±0.09	0.74±0.04	0.07±0.01	15.0±0.20	4.1±0.11	13.0	87.0
ГК5 (целина)	6.8±0.12	0.93±0.02	0.08±0.02	13.4±0.09	3.7±0.10	9.9	90.1

Гумификация поступающих в почву растительных остатков зависит от условий почвенной среды и химического состава гумусообразователей. Растительные организмы, в общем, содержат одни и те же группы веществ (липиды, белки, углеводы, лигнин и другие компоненты), соотношение которых в разных объектах неодинаково, что существенно влияет на скорость гумификации. Отличительной чертой химического состава фитомассы сухих ландшафтов является обедненность азотом – 1.45%, кальцием – 0.4%, магнием – 0.24%, фосфором, калием, но богатство целлюлозно-лигнинного комплекса, достигающего в корнях сухостепной растительности 67%, в т.ч. лигнина – 38% (Чимитдоржиева, Цыбикова, 2018). Таким образом, особенности почвенно-климатических факторов сухой степи отражаются на качественном составе растительности – главном источнике гумуса.

Каштановые почвы Забайкалья, распространенные на различных породах – песках, супесях, легкосуглинистых отложениях – и формирующиеся под влиянием региональных особенностей, отличаются от почв немерзлотного ряда. Им свойственен другой цветовой оттенок гумусного горизонта, с более коричневыми, а не бурными тонами, мучнистость карбонатного горизонта, отсутствие в профиле гипса и легкий гранулометрический состав, содержание в профиле камней и щебня. Для них характерны нейтральная реакция, незначительная сумма поглощенных оснований и низкое содержание гумуса.

Для выделения препаратов ГК использовали образцы, выделенные из гумусово-аккумулятивного горизонта каштановых почв: ГК1 – пашня Селенгинского среднегорья, ГК2 – целина Селенгинского среднегорья, ГК3 – целина Удинское плоскогорье, ГК4 – пашня Удинское плоскогорье, ГК5 – целина Иволгинской котловины.

Выделение препаратов ГК из гумусового горизонта и их очистку проводили стандартными методами (Орлов, Гришина, 1981) экстракцией 0.1 н раствором NaOH после предварительного декальцирования. Для ускорения фильтрации и коагуляции коллоидных частиц добавляли насыщенный раствор Na₂SO₄ (20% от объема экстракта) и центрифугировали в течении 1 ч при 13000 об./мин. Препараты ГК очищали путем переосаждения 20% раствором HCl до величины pH 1.5-2.0 и многократного центрифугирования. Осадок промывали 0.1 н HCl, затем дистиллированной водой, высушивали при температуре 40°C и растирали до состояния пудры. Зольность препаратов определяли путем сжигания в муфельной печи (800°C, 4 ч). Результаты были скорректированы на влажность и зольность образцов. Зольность препаратов, определенная гравиметрически, не превышала 5%. Процентное содержание кислорода рассчитывали по разнице общей массы образца и гравиметрической концентрации CHN и золы.

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. Частота вращения образца 6 kHz, время контакта – 5 мс, время релаксации – 5 с, количество накоплений – 3500-13000 сканов.

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.

Статистическую обработку результатов проводили с использованием программы Microsoft Excel 2019. В таблицах приведены средние значения и стандартная ошибка. Все статистические процедуры выполняли при уровне значимости $\alpha=5\%$.

Результаты и обсуждение

Элементный состав ГК. Одним из признаков ГК, специфичных по отношению к климату и природной обстановке в целом, адекватно отражающих состояния природной среды в период своего формирования и сохраняющихся в диагенезе, являются элементный состав и особенно соотношение основных элементов (Дергачева и др., 2012; Фадеева и др., 2014). Элементный состав ГК является одним из главных признаков, по которым идентифицируются эти природные вещества (Tikhova, Fadeeva, 2013).

Полученные данные по элементному составу ГК каштановых почв (табл. 2) позволили отметить меньшее содержание углерода и азота, по сравнению с аналогичными почвами немерзлотного ряда Западной Сибири и ЕЧР (Орлов, 1990; Кленов, 2000). Пониженное содержание данных элементов и несколько повышенное водорода объясняется недостаточной увлажненностью почвы, при которых реакции конденсации ослаблены, что соответствует экологическим условиям исследуемой территории и свидетельствует об относительной незрелости этих кислот и значительном участии периферических фрагментов в их структуре.

Таблица 2. Элементный состав гуминовых кислот каштановых почв Западного Забайкалья.

Препарат	Атомные %				Атомные отношения			Степень окисленности	Степень бензоидности
	С	Н	О	N	H/C	O/C	C/N		
ГК1 (пашня)	38.7±0.5	40.8±0.6	17.3±0.2	3.0±0.2	1.05	0.45	12.9	-0.18	22
ГК2 (целина)	38.9±0.6	40.7±0.4	18.6±0.3	2.5±0.1	1.04	0.48	15.6	-0.06	19
ГК3 (целина)	36.3±0.5	42.7±0.5	17.3±0.3	3.7±0.1	1.20	0.48	9.8	-0.03	10
ГК4 (пашня)	39.3±0.6	39.2±0.5	18.7±0.3	2.8±0.1	0.99	0.48	14.0	-0.04	23
ГК5 (целина)	38.1±0.4	41.7±0.6	17.5±0.2	2.8±0.1	1.09	0.46	13.6	-0.15	13

Показатель H/C является климатогенно обусловленным, при разном сочетании теплообеспеченности и увлажненности его значения специфичны для почв Западной Сибири, Горного Алтая, Урала и Поволжья (Дергачева и др., 2012). Атомные отношения H/C и O/C позволяют оценить такие параметры структуры, как содержание ненасыщенных фрагментов и кислородсодержащих функциональных групп. Так, при соотношении H/C<1 можно говорить о преобладании в структуре ГК ароматических фрагментов. Однако при соотношении $1 < H/C < 1.4$ структура ГК носит преимущественно алифатический характер (Орлов, 1990).

Результаты показали, что количество атомов водорода и углерода находится почти на одном уровне, следовательно, в составе ГК наряду с хорошо развитыми конденсированными структурами ядерной части макромолекулы значительна доля углерода в боковых алифатических цепях, что в свою очередь указывает на невысокую степень гумификации ПОВ. Отношение C/N, отражающая роль азотсодержащих соединений в процессе гумификации свидетельствует о низкой обогащенности ГК азотом, т.к. они формируются из обедненных азотом растительных остатков с высоким содержанием целлюлознолигнинного комплекса.

Показатель степени бензоидности, рассчитанный по модифицированной формуле Д. Ван-Кревелена (Орлов, 1990) и отражающий соотношение ароматических и алифатических структур в макромолекулах ГК, варьирует от 10 до 23%. В процессе разложения органического вещества, образующиеся простые соединения, видимо, активно участвуют в формировании периферической части молекулы, поэтому степень бензоидности каштановых длительносезонопромерзающих почв невелика. Эти величины при сравнении с аналогичными почвами немерзлотного ряда значительно ниже, но близки к показателям дерново-подзолистых почв; вероятно, их сближают более жесткие условия формирования. С увеличением продолжительности периода биологической активности у почв немерзлотного ряда формирующиеся ГК получают меньше материала для построения периферической части молекул, а в процессе гумификации отщепляется все больше алифатических группировок, что и обеспечивает более высокую степень бензоидности. Атомное отношение О/С каштановых почв не дает оснований говорить о принципиальных различиях в построении макромолекул ГК. Процесс гумификации характеризуется небольшим нарастанием степени окисленности образующихся продуктов при распашке почв, т.к. интенсивная обработка почв и усиление их аэрации могут и должны вызывать нарастание окисленности гумусовых веществ. По мнению Д.С. Орлова (1990), степень окисленности также зависит от сезона года: максимальная аэрируемость почв и высокие температуры летом повышают степень окисленности ГК, а осенью развиваются восстановительные процессы.

Расчеты коэффициентов корреляции по данным элементного состава показали, что взаимосвязь между гранулометрическим составом со степенью окисленности и степенью бензоидности почти всегда положительная и наиболее тесная в пахотных вариантах каштановых почв ($r = 0.63-0.72$, $\alpha = 5\%$). Данная связь ослабевает в целинных каштановых почвах ($r = 0.52-0.61$, $\alpha = 5\%$). Корреляционная зависимость между содержанием общего углерода в почве со степенью окисленности и бензоидности менее тесная и может быть как положительной, так и отрицательной ($r = -0.37-0.43$, $\alpha = 5\%$).

Под влиянием криоаридных условий, низкой продолжительности биологической активности процессы окисления и дегидратации имеют низкую интенсивность, что приводит к накоплению неспецифических органических компонентов в периферической части ГК, поэтому степень бензоидности гуминовых кислот исследуемых почв невысока. Одной из главных причин колебаний элементного состава ГК в пределах одной группы является пространственная и временная изменчивость почв, а состав кислот зависит как от гетерогенности почв, так и от той биохимической ситуации, которая имело место к моменту взятия почвенного образца.

Структурный состав ГК. Для оценки связи между элементным составом и структурными особенностями ГК мы проанализировали спектры ^{13}C -ЯМР препаратов ГК исследуемых почв (рис.) и идентифицировали следующие области: С, Н-замещенные алифатические фрагменты (0-45 ppm), метоксильные и О-, N-замещенные алифатические фрагменты (45-65 ppm), алифатические фрагменты, дважды замещенные гетероатомами (в т.ч. углеводные), и метиленовый углерод простых и сложных эфиров (95-165 ppm), области карбоксилов, амидов и их производных (165-185 ppm) и область хинонных групп, альдегидов и кетонов (185-200 ppm; Vasilevich et al., 2018).

Оценка относительного содержания атомов углерода основных функциональных групп и структурных фрагментов в препаратах ГК каштановых почв проведена нами интегрированием линий поглощения в соответствующих диапазонах химических сдвигов (табл. 3). В алифатической области во всех спектрах ГК присутствует значительное количество атомов углерода алкильных фрагментов, не связанных с гетероатомами (C_nH_m), сосредоточенных в области (25-35 ppm) и характеризующихся наибольшей устойчивостью к трансформации среди алифатических компонентов. Высокая доля алифатических фрагментов в данной области, как установлено некоторыми исследователями (Lodygin, Beznosikov, 2005; Winkler et al., 2005), связана с накоплением воскоподобных, гликолипидов и кутина из растений. В препаратах ГК, выделенных из целинных вариантов, пик наиболее выражен из-за объема и состава органических остатков, а также специфических биохимических условий их разложения. Во всех спектрах ГК присутствуют отчетливые пики в диапазоне 45-65 ppm, который связан с метоксильными группами, обусловленными присутствием лигниновых и аминокислотных фрагментов (Knicker et al., 2008). Наличие сигналов в области 65-95 ppm относят к углероду $\text{C}_n(\text{OH})_m$ групп, которые принадлежат к целлюлозным или другим углеводным фрагментам (Simpson A., Simpson M., 2009).

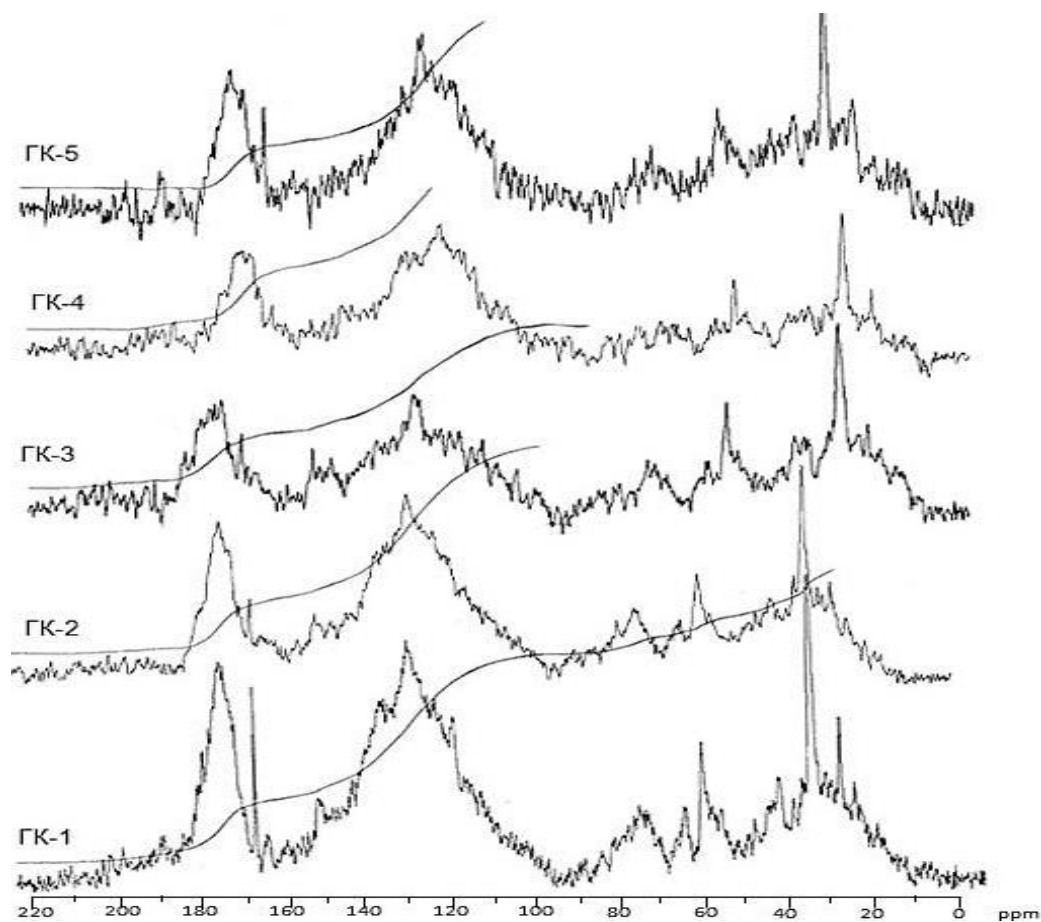


Рис. Спектры ^{13}C -ЯМР гуминовых кислот каштановых почв Западного Забайкалья.

Таблица 3. Содержание структурных фрагментов гуминовых кислот каштановых почв Западного Забайкалья по данным ^{13}C -ЯМР, %.

Препарат	Химический сдвиг, ppm						AR/AL
	0-45	45-65	65-95	95-165	165-185	185-200	
ГК1 (пашня)	20.6	4.7	9.9	45.2	15.8	3.8	1.28
ГК2 (целина)	21.6	7.9	9.8	41.6	13.2	5.9	1.05
ГК3 (целина)	27.6	8.2	12.7	35.3	12.6	3.6	0.72
ГК4 (пашня)	18.2	4.7	9.5	45.9	15.2	6.5	1.41
ГК5 (целина)	31.9	7.9	9.6	37.8	11.9	0.9	0.76

В области ароматических фрагментов наиболее широкие и сильные сигналы могут давать незамещенные и/или алкил-замещенные ароматические атомы углерода (95-165 ppm). Сигналы в данной области были более выражены в пахотных образцах, чем в целинных. На всех спектрах ГК в области 165-185 ppm четко выделяются резонансы, относимые к углероду карбоксильных групп, который также может принадлежать и карбонил-группе амидов и полипептидов (Лодыгин и др., 2014), однако принципиальных различий в препаратах ГК не просматривается. 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 (засушливость, легкий гранулометрический состав), наличие сезонной мерзлоты, которые снижают активность почвенных микроорганизмов.

Для сравнения степени ароматичности структурных фрагментов ГК исследованных почв было использовано соотношение углерода ароматических структур к углероду алифатических цепей AR (95-165 ppm)/ AL (0-95 ppm), отражающее содержание ароматических групп. Данное соотношение структуры гуминовых кислот отражает преобладание процесса минерализации органического вещества над гумификацией в целинных каштановых почвах и неустойчивость ГК к окислению. Кроме того, низкая ароматичность гуминовых кислот может быть обусловлена низким содержанием ароматических веществ в прекурсорах гумификации. Для исследованных ГК каштановых почв Забайкалья показана низкая зрелость макромолекул, что свидетельствует о замедленных процессах гумификации. Низкая биологическая активность трансформации органического вещества может быть связана с химическим составом гумусообразователей, так и с холодным климатом региона.

Выводы

Формирование криоаридных каштановых почв Западного Забайкалья с укороченным гумусовым профилем происходит под влиянием сходных процессов: легкого гранулометрического состава, неблагоприятных водно-физических свойств, небольшой емкости катионного обмена, длительного пребывания почв в мерзлотном состоянии. Различие заключается в степени выраженности признаков, возникающих в ходе почвообразования.

Сравнительный анализ элементного состава и ЯМР-спектроскопии гуминовых кислот каштановых почв Западного Забайкалья позволяет рассматривать их как соединения со сходным принципом химического строения, различающиеся качественным и количественным содержанием молекулярных структур и различной их организацией по отношению к конденсированному ароматическому ядру. Особенность процесса гумусообразования каштановых почв проявляется в том, что, несмотря на жесткие условия почвообразования, образуются ГК с довольно высоким содержанием С, N и O. Макромолекулы ГК в пахотных образцах каштановых почв имеют более сложное строение, менее развитую периферическую часть, высокую степень бензоидности по сравнению с ГК целинного варианта, что обусловлено условиями почвообразования и в первую очередь химическим составом разлагающихся растительных остатков и экологических условий. Низкие концентрации органического вещества в каштановых почвах, а также незначительное содержание карбоксильных функциональных групп в структуре ГК снижают протекторную роль гумуса. Данный аспект особенно важен в случае усиления антропогенной нагрузки на почву.

Финансирование. Исследования выполнены в рамках госзадания Института общей и экспериментальной биологии СО РАН № 121030100228-4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дергачева М.И., Некрасова О.А., Оконешникова М.В., Васильева Д.И., Гаврилов Д.А., Очур К.О., Ондар Е.Э. 2012. Соотношение элементов в гуминовых кислотах как источник информации о природной среде формирования почв // Сибирский экологический журнал. № 5. С. 643-647.
- Кленов Б.М. 2000. Устойчивость гумуса автоморфных почв Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 173 с.
- Лодыгин Е.Д., Безносиков В.А., Василевич Р.С. 2014. Молекулярный состав гумусовых веществ тундровых почв (^{13}C -ЯМР-спектроскопия) // Почвоведение. № 5. С. 546-552.
- Ногина Н.А. 1964. Почвы Забайкалья. М.: Наука. 312 с.
- Орлов Д.С. 1990. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд-во МГУ. 324 с.
- Орлов Д.С., Гришина Л.А. 1981. Практикум по химии гумуса. М.: Изд-во Московского университета. 273 с.
- Фадеева В.П., Тихова В.Д., Дерябина Ю.М., Никуличева О.Н. 2014. Определение органогенных элементов в составе функциональных веществ и материалов // Журнал структурной химии. № 5. С. 1017-1024.
- Цыбжитов Ц.Х., Цыбикдоржиев Ц.Ц., Цыбжитов А.Ц. 1999. Почвы бассейна озера Байкал. Т. 1: Генезис, география и классификация каштановых почв. Новосибирск: Наука. 128с.
- Чимитдоржиева Г.Д. 2019. К вопросу о восстановлении плодородия дефлированных сухостепных почв (на примере модельных лабораторных опытов) // Аридные экосистемы. Т. 25. № 1 (78). С. 43-48. [Chimitorzhieva G.D. 2019. Fertility Restoration in Deflated Dry Steppe Soils on the Example of Model Laboratory Experiments // Arid Ecosystems. Vol. 9. No. 1. P. 36-40.]
- Чимитдоржиева Г.Д., Цыбикова Э.В. 2018. Своеобразие каштановых почв южных котловин Сибири // Аридные экосистемы. № 4 (24). С. 29-35. [Chimitorzhieva G.D., Tsybikova E.V. 2018. Specific Features of

- Chestnut Soils in the Southern Basins of Siberia // *Arid Ecosystems*. Vol. 8. No. 4. P. 254-259.]
- Чуков С.Н., Лодыгин Е.Д., Абакумов Е.В. 2018. Использование ^{13}C ЯМР-спектроскопии в исследовании органического вещества почв (обзор) // *Почвоведение*. № 8. С. 952-964.
- Canellas L.P., Olivares F.L. 2014. Physiological responses to humic substances as plant growth promoters // *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. No. 1. Article No. 3.
- Fang C., Smith P., Moncrieff J.B., Smith J.U. 2005. Similar response of labile and resistant soil organic matter pools to changes in temperature // *Nature*. No. 433. P. 57-59.
- Gerke J. 2018. Concepts and misconceptions of humic substances as the stable part of soil organic matter: A review // *Agronomy*. Vol. 8. No. 76 [Электронный ресурс <https://www.mdpi.com/2073-4395/8/5/76> (дата обращения 01.12.2024)]
- Knicker H., Hilscher A., González-Vila F.J., Almendros G. 2008. A new conceptual model for the structural properties of char produced during vegetation fires // *Organic Geochemistry*. No. 39 (8). P. 935-939.
- Kogel-Knabner I., Rumpel C. 2018. Advances in Molecular Approaches for Understanding Soil Organic Matter Composition, Origin, and Turnover: A Historical Overview // *Advances in Agronomy*. No. 149. P. 1-48.
- Lal R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change // *Geoderma*. No. 123 (1-2). P. 1-22.
- Lodygin E.D., Beznosikov V.A. 2005. Influence of soil moisture on concentrations and ^{13}C NMR profiles of lipids in three Albeluvisols // *Geoderma*. No. 3 (4). P. 253-262.
- Mao J., Cao X., Olk D.C., Chu W., Schmidt-Rohr K. 2017. Advanced solid-state NMR spectroscopy of natural organic matter // *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*. No. 100. P. 17-51.
- Olk D.C., Bloom P.R., Perdue E.M., McKnight D.M., Chen Y., Fahrenhorst A., Senesi N., Chin Y.-P., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Harir M. 2019. Environmental and Agricultural Relevance of Humic Fractions Extracted by Alkali from Soils and Natural Waters // *Journal of Environmental Quality*. No. 48. P. 217-232.
- Patton N.R., Lohs K.A., Seyfried M.S., Godsey S.E., Parsons S.B. 2019. Topographic controls of soil organic carbon on soil-mantled landscapes // *Scientific Reports*. No. 9 (1). Article No. 6390.
- Paul E.A. 2016. The nature and dynamics of soil organic matter: Plant inputs, microbial transformations and organic matter stabilization // *Soil Biology & Biochemistry*. No. 98. P. 109-126.
- Piccolo A. 2002. The Supramolecular structure of humic substances. A novel understanding of humus chemistry and implications in soil // *Advances in Agronomy*. No. 75. P. 57-134.
- Simpson A.J., Simpson M.J. 2009. Nuclear magnetic resonance analysis of natural organic matter. Biophysico-chemical processes involving natural nonliving organic matter in environmental systems. New Jersey: John Wiley & Sons Inc. P. 589-650.
- Stevenson F.J. 1994. Humus chemistry: genesis, composition, reactions. N.Y.: John Wiley & Sons. 512 p.
- Tikhova V.D., Fadeeva V.P. 2013. Methodical basis of analysis for various genesis of humic acids // *Functions of natural organic matter in changing environment*. Pt. I. P. 165-169.
- Vasilevich R., Lodygin E., Beznosikov V., Abakumov E. 2018. Molecular composition of raw peat and humic substances from permafrost peat soils of European Northeast Russia as climate change markers // *Science of the Total Environment*. Vol. 615. P. 1229-1238.
- Winkler A., Haumaier L., Zech W. 2005. Insoluble alkyl carbon components in soils derive mainly from cutin and suberin // *Organic Geochemistry*. No. 36. P. 519-529.
- Woo D.K., Quijano J.C., Kumar P., Chaoka S., Carl J., Bernacchi C.J. 2014. Threshold dynamics in soil carbon storage for bioenergy crops // *Environmental Science & Technology*. No. 48. P. 12090-12098.
- WRB – World Reference Base for Soil Resources. 2022. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. Vienna, Austria: International Union of Soil Sciences (IUSS). 236 p.