

УДК 631.4

ПАХОТНЫЕ СУХОСТЕПНЫЕ ПОЧВЫ ЗАПАДНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ: МОРФОЛОГИЯ, СВОЙСТВА ПОЧВ, МИКРОБНАЯ БИОМАССА, ГУМИНОВЫЕ КИСЛОТЫ

© 2025 г. Э.О. Чимитдоржиева*, Ц.Д.Ц. Корсунова*, Э.В. Цыбикова**

*Институт общей и экспериментальной биологии Сибирского отделения РАН
Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6.

**Бурятская государственная сельскохозяйственная академия им. В.Р. Филиппова
Россия, 670034, г. Улан-Удэ, ул. Пушкина, д. 8. E-mail: erzhenach@mail.ru

Поступила в редакцию 26.12.2024. После доработки 10.01.2025. Принята к публикации 10.02.2025.

Целью работы было изучение свойств почв, С-биомассы и структуры гуминовых кислот пахотных каштановых почв Западного Забайкалья. Объектами исследования являются пахотные каштановые почвы южных котловин Западного Забайкалья (Тугнуйская котловина, Селенгинская котловина, Иволгинская котловина). Для сравнения пахотные почвы изучались попарно с целинными аналогами. Пахотные каштановые почвы характеризуются низким уровнем плодородия: низким содержанием гумуса ($0.98 \pm 0.07\%$), общего азота ($0.08 \pm 0.01\%$), мощностью пахотного горизонта (21.33 ± 2.31 см) и легкосуглинистым гранулометрическим составом. За вегетационные периоды средние показатели накопления углерода биомассы составили 35.77 ± 3.09 мг С/100 г почвы. Доля С-биомассы в общем запасе органического углерода для исследуемых почв составляет до 2.5%. Содержание алифатического углерода впахотной каштановой почве также ниже, чем в целине. Содержание углерода аминогруппы и метоксильной группы на целине составляет $7.9 \pm 0.14\%$, тогда как в пахотных почвах оно почти в 2 раза меньше. Количество углерода карбоксильных групп составляет $15.5 \pm 0.42\%$ в пахотных каштановых почвах и $12.55 \pm 0.92\%$ на целинных.

Анализ спектров ^{13}C -ядерного магнитного резонанса (ЯМР) гуминовых кислот в почвах может предоставить важную информацию о химическом составе и структурных особенностях органических веществ в почвах. Для пахотных и целинных каштановых почв Забайкалья такой анализ может выявить различия, связанные с использованием земель в сельском хозяйстве. Алифатический углерод в гуминовых кислотах пахотной почвы выражен слабее, что свидетельствует о большей роли ароматического углерода в ее макромолекулярной структуре. Наблюдается закономерность: в пахотных землях содержание алифатических соединений ниже, чем на целине. Выявлено, что сельскохозяйственная обработка приводит к изменению молекулярной структуры гуминовых кислот, что выражается в росте доли ароматического углерода в пахотной почве. В элементном составе гуминовых кислот пахотных каштановых почв Забайкалья содержание углерода выше, а водорода ниже, чем на целинных аналогах. Высокое содержание водорода на целине приводит к относительно развитым боковым углеродным цепям в кислотах. В пахотной почве в макромолекуле гуминовых кислот больше азота 2.9 ат.%, чем на целине, где этот показатель составляет 2.7 ат.%. Величина атомного отношения (Н:С) на каштановой пашне составила 1.0, на целине – 1.1. В пахотных вариантах степень бензоидности составляет 22.5, на целине она ниже – 16.4. Установлено, что элементный состав пахотных каштановых почв характеризуется более конденсированной структурой в сравнении с целинными.

Ключевые слова: углерод, микробная биомасса, гуминовые кислоты, ^{13}C -ЯМР-спектроскопия, элементный состав, каштановые почвы, пашня, целина, Забайкалье.

DOI: 10.24412/1993-3916-2025-2-69-79

EDN: KFGOLT

В сухостепных геосистемах Тугнуйской котловины преобладающим типом почв являются каштановые. Располагаясь на наиболее инсолируемых формах рельефа, почвы каштанового типа являются самыми теплообеспеченными в Забайкалье (Биологическое ..., 2002). Каштановые почвы занимают основной фонд пахотных земель (43%) в Республике Бурятия (Запханов, 2016).

Сельскохозяйственное использование почв является мощным фактором их антропогенной эволюции, оказывая влияние на все стороны функционирования почвенной системы: от теплового, воздушного и водного режимов до системы гумусовых веществ и биологической активности (Девятова и др., 2004; Караваева, 2005; Русанов, 2003; Щеглов, 2003).

Биомасса микроорганизмов имеет большое значение в преобразовании всех биогенных макроэлементов в экосистеме. Микробная биомасса является индикатором уровня биологической активности почвы и используется в качестве одного из критериев для оценки биологического качества органического вещества почвы (ОВ). Микроорганизмы в почве играют важную роль в сельском хозяйстве и экосистемах (Hermans et al., 2020; Naylor et al., 2022; Dion, Nautiyal, 2023). Микробные сообщества оказывают прямое воздействие на ее функциональные характеристики почвы, участвуя в круговороте питательных веществ и накоплении углерода (Xue et al., 2018).

Органическое вещество почвы является основным фактором, влияющим на плодородие почвы (Weber et al., 2024; Ma, Xiao, 2023). ОВ влияет на круговорот питательных веществ и биологические, физические и химические свойства почвы, но также играет важную роль в глобальном цикле углерода (Ciavatta et al., 2022). ОВ имеет большое значение для устойчивого сельскохозяйственного производства и повышения устойчивости агроэкосистем к изменению климата (Audette et al., 2022; Mohammed et al., 2023).

Гумификация органического вещества обычно связана с изменением элементного состава молекул гуминовых веществ, что выражается в изменении соотношения С, Н, N и О, а также в модификации наиболее ценных функциональных групп (в основном карбоксильных и фенольных). Более гумифицированное органическое вещество, по сравнению с менее гумифицированным, отличается повышением ароматичности молекул, снижением содержания водорода, повышением содержания углерода и увеличением количества карбоксильных и метоксигрупп (Visser, 1983). Значительную часть органического вещества в почвах составляют гуминовые вещества (до 85%), микроорганизмы (5%) и корни растений (10%; Schnitzer, Monreal, 2011; Song et al., 2023). ГК является важным компонентом органического вещества почвы, ГК с ее богатыми функциональными группами и сложной химической структурой (Weisheng et al., 2024; Zhang et al., 2024; Yuxin et al., 2024) признана важнейшим компонентом плодородия почвы (Tan, Noramornbodi, 1979).

Гуминовые кислоты представляет собой сложную и гетерогенную смесь ароматических и алифатических органических соединений с органическими супрамолекулярными системами, существующими в воде, почве и осадках (Li et al., 2020). ГК считается перспективным средством для улучшения плодородия почвы (Zhou et al., 2024), поэтому важно изучать свойства ГК в различных типах почв в различных почвенных и климатических зонах. ГК влияет на почву посредством своих физических, химических и биологических эффектов, которые способствуют образованию почвенных агрегатов, повышают емкость катионного обмена, регулируют pH почвы и улучшают удержание воды в почве, удержание питательных веществ, азотфиксационную способность и микробную активность (Karakurt et al., 2009). Землепользование и агротехника оказывают влияние на многие свойства почв, такие как сорбционные и буферные функции, продуктивность земель, а также на содержание и качество органического вещества почвы (Ellerbrock et al., 2001).

Значение органического вещества в формировании качества почвы велико. Ускоренная деградация органического вещества почвы широко наблюдается в условиях антропогенного прессинга и изменения климата (Debicka, 2024). Исследования (Lodygin, Abakumov, 2024) показали, что вовлечение целинных земель в пахотное земледелие приводит к снижению алифатических фрагментов в структуре гуминовых кислот.

Сухостепная зона играет огромную роль в развитии зернового хозяйства страны. Около 10% всех пахотных территорий России располагается в зоне сухой степи (Naumov, 2023). В литературе имеются данные о влиянии антропогенной нагрузки на структуру и состав гуминовых кислот в обыкновенном черноземе. Авторами установлено, что независимо от характера и степени изменений трансформация молекул гуминовых кислот не выходит за пределы, определяемые типом почвообразования (Gorbov, Bezuglova, 2013). Влияние климатических условий на изменение запаса органического углерода в пахотных черноземах оценено в работе (Sukhoveeva et al., 2020).

Целью работы было изучение пахотных каштановых почв Западного Забайкалья: свойств, С-биомассы и структуры гуминовых кислот в сравнении с их целинными аналогами. Изучение

изменений в свойствах пахотных почв и их влияние на её плодородие играет важную роль в обеспечении устойчивого сельского хозяйства.

Материалы и методы

Объектами исследования являются пахотные каштановые почвы Западного Забайкалья (Тугнуйская, Гусиноозерская, Иволгинская котловины). Для сравнения попарно изучались целинные аналоги почв в каждой из исследованных котловин. Расположение экспериментальных площадок (ЭП) показано ниже на рисунке 1.

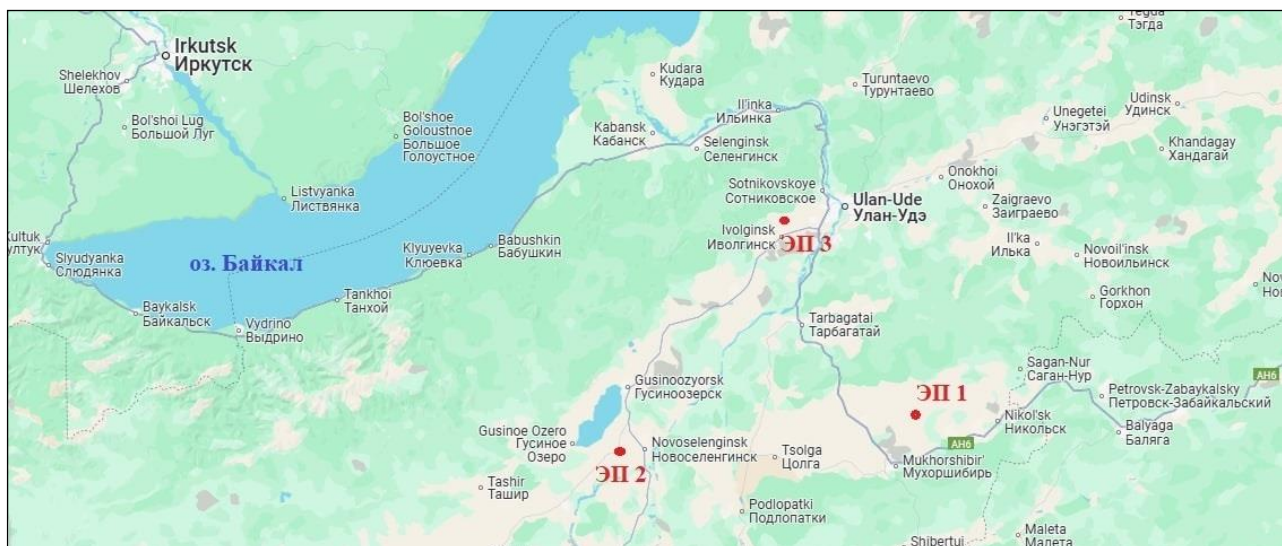


Рис. 1. Расположение экспериментальных площадок. *Условные обозначения:* ЭП1 – каштановые почвы Тугнуйской котловины, ЭП2 – каштановые почвы Гусиноозерской котловины, ЭП3 – каштановые почвы Иволгинской котловины.

Бассейн Байкала характеризуется уникальным разнообразием животного и растительного мира, а также разнообразием природных ландшафтов (Бажа и др., 2021). Здесь оказывают влияние различия в экспозиции, меридиональности, аридности и высотной поясности (Бажа и др., 2022).

Климат Забайкалья определяется её континентальным положением, находясь на значительном удалении от морей и океанов, а также высотой над уровнем моря. Регион расположен там, где сталкиваются различные воздушные массы, поступающие из Атлантического, Тихого и Северного Ледовитого океанов, каждая из которых по-разному влияет на климат этого района (Трофимова, Балыбина, 2024). В исследуемом регионе аридные характеристики почвенного климата наиболее отчетливо выражены в каштановых почвах. Основной чертой климата сухостепной зоны является еще более выраженный, чем в степи, дисбаланс между количеством осадков и испарением. В течение года количество осадков варьируется от 180 до 250 мм, при этом испарение превосходит их в два-три раза, составляя 340-875 мм ($K = 0.33-0.55$; Ногина, 1964). В течение продолжительной и суровой зимы почва запасает значительное количество холода, промерзая на глубину 200-300 см и оставаясь в мерзлом состоянии на протяжении 5-7 месяцев. Весна холодная, сухая, сопровождается частыми ветрами и значительными суточными изменениями температуры. Лето жаркое, сухое, короткое, безморозный период длится 80-119 дней.

Сельское хозяйство в Республике Бурятия сталкивается с рядом климатических вызовов, обусловленных суровым климатом. Условия, такие как холодные малоснежные зимы и жаркое, засушливое лето, требуют адаптивных стратегий ведения сельского хозяйства. Кратко климат республики можно определить как криоаридный. В данных агроклиматических условиях земледелие всегда сопровождается рисками и ограничивается небольшим количеством возделываемых культур. Отмечено, что с 1970 до 2015 год по сухостепным станциям (Кяхта, Новоселенгинск и Хоринск) среднегодовая температура выросла с -0.5 до $+0.98^{\circ}\text{C}$, с -1.5 до -0.48°C и с -2.5 до -1.84°C (Болданов, Мухин, 2019).

Почвенные образцы отбирались по генетическим горизонтам. Техника отбора состояла в следующем: на очищенной передней стенке разреза в пределах каждого генетического горизонта отмечаются места и глубины взятия образцов, затем очерчиваются ножом, расположенным в средней, наиболее характерной части горизонта.

Физико-химические свойства почв (гумус, рН, азот, гранулометрический состав почвы) определяются общепринятыми в почвоведении методами (Аринушкина, 1970). Углерод микробной биомассы (С-биомассы) определен в почве регидратационным методом по Т.Г. Мирчинку и Н.С. Паникову (Ганжара и др., 2004).

Для изучения состава и свойств гуминовых кислот каштановых почв препараты ГК были выделены исчерпывающим экстрагированием по стандартной методике Д.С. Орлова и Л.А. Гришиной (1981). В полученных препаратах гуминовых кислот элементный состав определен на элементном анализаторе CHNS/O Series II от компании Perkin Elmer в Институте общей и экспериментальной биологии СО РАН. Спектры ¹³С-ЯМР были сняты на спектрометре AM-400 на частоте 100.614 МГц в Институте органической химии СО РАН (г. Новосибирск).

Экспериментальные данные были обработаны с использованием Microsoft Excel 2010 из пакета Microsoft Office.

Результаты и обсуждение

Морфологические признаки пахотных каштановых почв южных котловин можно охарактеризовать описанием следующих разрезов.

ЭП 1. Разрез 6Ч. Республика Бурятия, Тугнуйская котловина, пашня. Посев яровой пшеницы.

Апах	0-24	Каштановый непрочнокомковатый легкий суглинок, имеются включения культурных растений, от 10% HCl не вскипает, уплотнен, переход четкий по цвету.
АВ	24-34	Бурый непрочнокомковатый легкий суглинок, имеются единичные включения корней, уплотнен, не вскипает от 10% HCl, переход ясный по цвету, по линии вскипания.
Вк ₁	34-67	Светло - бурая бесструктурная супесь, бурно вскипает от HCl, уплотнен, переход в следующий горизонт четкий по цвету.
Вк ₂	67-104	Бурая бесструктурная супесь, бурно вскипает от HCl на карбонатных выцветках, уплотнен, имеется мелкий гравий, переход в следующий горизонт по цвету и гранулометрическому составу.
Ск	104-200	Светло-бурая бесструктурная супесь, бурно вскипает от HCl на карбонатный выцветках, уплотнен.

ЭП 2. Разрез 1ЧЦ. Республика Бурятия, Гусиноозерская котловина, пашня. Посев овса.

Апах	0-20	Серовато-коричневая супесь, мелкокомковатая структура, свежий, рыхлый, корни, переход в следующий горизонт по плотности и по цвету.
Ап/пах	20-29	Светло-коричневая супесь, бесструктурная, свежий, уплотнен, корни, переход по цвету, граница ровная.
В1	29-50	Светло-коричневая бесструктурная супесь, влажная, единичные корни, переход по линии вскипания.
Вк	50-84	Серо-коричневая с белесым оттенком супесь, бесструктурная, корней нет, бурно вскипает от 10% HCl, переход по цвету.
ВкС	84-100	Серовато-белесая бесструктурная супесь, хрящеватый, влажный, корней нет, вскипание слабое, переход ясный по цвету и слабому вскипанию.
С	100-150	Серая бесструктурная супесь, свежий, не вскипает, мелкие камни с карбонатными натечками.

ЭП 3. Разрез 4ЧЦ. Республика Бурятия, Иволгинская котловина, пашня. Пар.

Апах	0-20	Буровато-коричневая супесь, комковато-пылеватой структуры, сухая, рыхлая, присутствуют растительные остатки, переход заметный по плотности.
Ап/пах	20-30	Буровато-коричневая супесь, уплотнена, слабощебнистая, непрочнокомковатая структура, свежий, пронизана корнями, переход постепенный.

В1	30-50	Желтовато-бурая супесь, непрочной комковатой структуры, свежий, корни, переход ясный по вскипанию.
Вк	60-70	Белесовато-бурая супесь, уплотнена, бесструктурная, увлажнена, вскипает от 10% HCl.

Пахотные каштановые почвы характеризуются низким содержанием гумуса – $0.98 \pm 0.07\%$, общего азота – $0.08 \pm 0.01\%$, мощностью пахотного горизонта – 21.33 ± 2.31 см, легкосуглинистым гранулометрическим составом (табл. 1). В верхних горизонтах реакция среды близка к нейтральной ($pH = 6.5-6.9$), с глубиной в результате появления карбонатов pH постепенно становится щелочной ($pH \leq 7.8-8.6$).

Таблица 1. Физико-химические свойства пахотных и целинных каштановых почв.

Котловина	Горизонт	Глубина, см	pH	Гумус, %	N общ, %	Частицы размером < 0.01 мм, %
Тугнуйская, пашня	Апах	0-24	6.9	1.0	0.08	20.5
	АВ	24-34	7.3	0.8	0.04	18.0
	Вк ₁	34-67	7.9	0.4	–	15.4
	Вк ₂	67-104	8.5	0.1	–	10.8
	Ск	104-200	8.6	–	–	9.2
Селенгинская, пашня	Апах	0-20	6.8	1.1	0.09	17.7
	Ап/пах	20-29	7.2	1.0	0.09	15.4
	В1	29-50	7.6	0.7	0.07	11.1
	Вк	50-84	8.3	–	–	14.8
	ВкС	84-100	8.2	–	–	10.5
	С	100-150	8.2	–	–	11.7
Иволгинская, пашня	Апах	0-20	6.5	0.9	0.07	13.0
	Ап/пах	20-30	6.6	0.9	0.07	12.0
	В1	30-50	7.3	0.5	0.04	8.0
	Вк	60-70	7.8	0.4	0.03	17.0
Тугнуйская, целина	А	0-26	6.7	2.2	0.17	27.5
	АВ	26-34	6.9	1.3	0.09	21.7
	В	34-70	7.2	0.7	–	19.3
	Вк	70-88	8	0.1	–	15.5
	Ск	88-150	8.4	–	–	15.3
Селенгинская, целина	А	0-11	7.1	1.8	0.1	12.5
	В1	11-24.	7.3	1.2	0.08	10.2
	В2	24-56	7.9	0.5	0.07	7.5
	С	56-100	7.9	–	–	9.6
Иволгинская, целина	А	0-23	6.8	1.0	0.08	9.9
	В1	23-43	7.1	0.7	0.07	6.5
	Вк	43-88	8.6	–	–	12.4
	С	88-100	–	–	–	12.2

Для сравнения исследованы целинные каштановые почвы. Целинные каштановые почвы Западного Забайкалья формируются под полынно-разнотравно-злаковой растительностью. Для целинных почв характерны: низкое содержание гумуса $1.66 \pm 0.63\%$, низкое содержание общего азота $0.12 \pm 0.05\%$, небольшая мощность гумусово-аккумулятивного горизонта 20 ± 7.94 см, легкосуглинистый гранулометрический состав (табл. 1). В верхних гумусовых горизонтах почв реакция среды близка к нейтральной и нейтральная ($pH = 6.7-7.1$), с глубиной в результате появления

карбонатов рН постепенно становится щелочной (рН – до 8.6). В профиле четко выражен карбонатный горизонт, гипс отсутствует.

В пахотных каштановых почвах содержание гумуса очень низкое. Установлено, что использование почв в сельском хозяйстве способствует уменьшению его содержания. Целинные почвы содержат больше азота, чем пахотные. Таким образом, исследуемые пахотные каштановые почвы характеризуются низким уровнем плодородия.

Продолжительное промерзание почвы и медленное оттаивание, низкие температуры и относительно низкая влажность в течение всего периода роста растений способствуют слабой гумификации органических остатков. Это, в свою очередь, приводит к низкой гумусной емкости при укороченном профиле. Ввиду жестких климатических условий Забайкалья нужно заметить, что совпадение времени максимальных температур с периодом повышенной влажности ведет к высокой активности всех биологических процессов в очень короткие сроки. Именно этот период времени во многом определяет направление и скорость биологического круговорота веществ, а, следовательно, и основные особенности гумусообразования в местных почвах. В подобных неблагоприятных условиях их продуктивность остается низкой, и лишь при выполнении научно обоснованной агротехнической системы можно достичь рентабельного производства.

В начале вегетационного периода уровень С-биомассы невысок, что обусловлено значительным промерзанием почвы и медленным нагреванием весной. Весной по мере оттаивания почвы значительное количество биогенных компонентов и органических остатков, поддающихся минерализации, служит стимулом для роста гидролитической микрофлоры. Накопление С-биомассы в пахотных каштановых почвах в весенний период составляло 24.00 ± 0.05 мг С/100 г почвы, в целинных 28.50 ± 0.08 мг С/100 г почвы.

В летние месяцы при благоприятной гидротермической обстановке уровень углерода в микробной биомассе постепенно возрастал и достигал максимума в июле, составив на пашне 29.14 ± 0.05 мг С/100 г почвы, а на целине – 34.85 ± 0.08 .

К концу периода вегетации отмечается уменьшение содержания С-биомассы, что обусловлено ослаблением биологических процессов в почве. В сентябре этот показатель составил на пашне 23.00 ± 0.04 мг С/100 г почвы, на целине – 29.50 ± 0.06 . За вегетационные периоды средние показатели составили 35.77 ± 3.09 мг С/100 г почвы в каштановых почвах.

Согласно нашим расчетам, вклад С-биомассы в общий запас органического углерода для исследуемых почв составляет до 2.5%. Например, в почвах Западной Сибири ее уровень варьирует от 1.2 до 7.5% (Наумова, 1993; Якутин, 1994).

По сравнению с данными о С-биомассе почв европейской части России и Западной Сибири количественные параметры, зафиксированные для каштановых почв в Западном Забайкалье, оказались значительно меньшими – от 20 до 45 мг С/100 г почвы.

Применение спектроскопии ^{13}C -ЯМР даёт возможность определить структурные характеристики макромолекул гуминовых кислот. Исследование ЯМР-спектров изучаемых образцов ГК позволило определить диапазоны химических сдвигов, соответствующих атомам углерода из разных групп (Холодов, 2011; Чуков и др., 2018):

- 0-45 м.д. – алифатические, -СН, -СН₂ и СН₃ группы,
- 45-60 м.д. – углерод аминогрупп, а также структур -О-СН₃ (метоксильных),
- 60-100 м.д. – углерод полисахаридов,
- 100-165 м.д. – углерод ароматических структур,
- 165-185 м.д. – углерод карбоксильных групп,
- 185-220 м.д. – углерод хинонных групп, альдегидов, кетонов.

Анализ количественного состава структурных фрагментов молекул гуминовых кислот показал значительные различия в содержании ароматических структур в зависимости от использования земель. Многие свойства гуминовых кислот определяются наличием и числом функциональных групп в их молекулах.

Исходя из данных спектра в интервале 106-140 и 140-160 ppm, характеризующих ароматические углеродные атомы, определён показатель общей ароматичности f_a , отражающий долю массы ароматических углеродных атомов. Значение показателя f_a уменьшается в следующей последовательности гумусовых горизонтов: каштановая пахотная почва – каштановая целина.

В каштановых пахотных землях ароматичность достигала 46%, тогда как в целинных каштановых почвах этот показатель составил 36% (табл. 2).

Таблица 2. Содержание молекулярных фрагментов ГК в каштановых почвах, %.

Угодье	Химический сдвиг, ppm						Σаром/ Σалиф	Арома- тичность (fa), %
	0-45	45-60	60-100	100-165	165-185	185-221		
Пашня	19.4±1.70	4.7±0.03	9.7±0.28	45.35±0.49	15.5±0.42	5.15±1.91	0.83± 0.01	45.5±0.71
Целина	26.75±7.28	7.9±0.14	9.7±0.14	39.7±2.69	12.55±0.92	3.4±3.54	0.66± 0.07	40±2.83

В спектрах ^{13}C -ЯМР наблюдаются интенсивные сигналы в диапазоне химических сдвигов 100-165 м.д., что типично для ароматических углеродных атомов. В каштановых почвах доля ароматических атомов углерода составила 45.7% на пашне и 37.8% на целине (рис. 2).

Присутствие алифатических структур в макромолекулярных соединениях гуминовых кислот подтверждается резонансными сигналами углеродных атомов в диапазоне 0-100 ppm. Эти сигналы менее выражены по сравнению с сигналами от ароматических фрагментов. В ЯМР спектрах в области 0-45 ppm регистрируются узкие и интенсивные пики, характерные для алифатического углерода, которые соответствуют алкильным структурам, пики наблюдаются при 29.422 ppm для образца целины и 29.059 ppm для пашни (рис. 2).

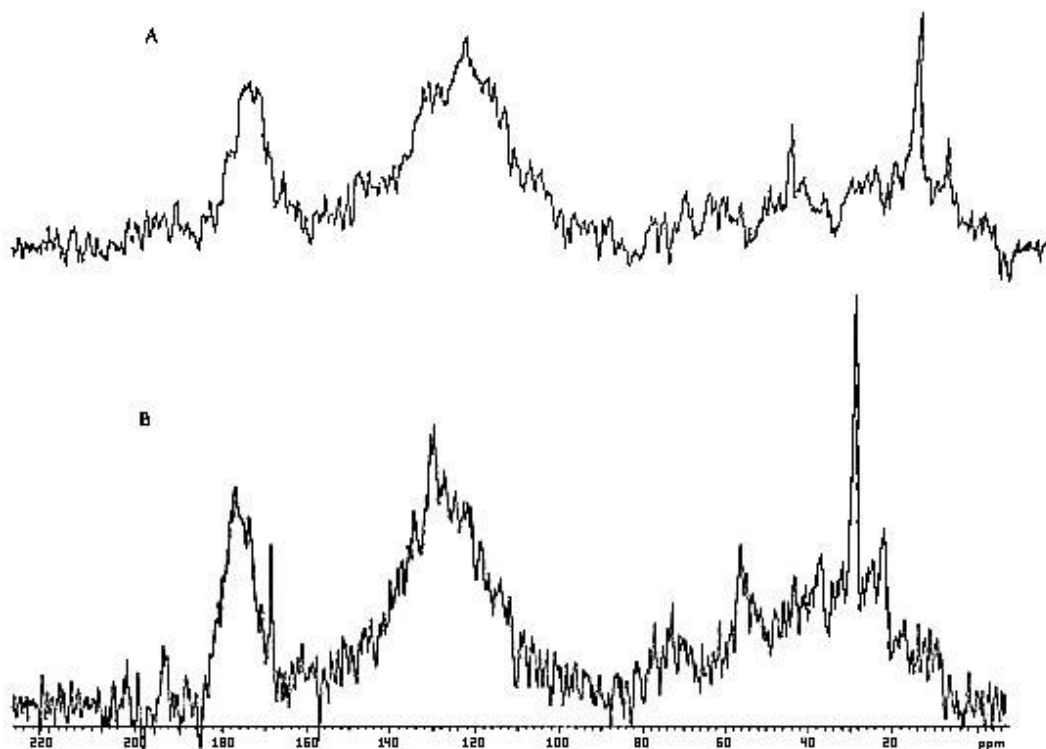


Рис. 2. Спектры ^{13}C -ЯМР ГК каштановых почв, ppm: А – пашня, В – целина.

Содержание алифатического углерода в пахотной каштановой почве ниже, чем в целине. Доля алифатического углерода в ГК целинной каштановой почвы имеет высокие значения (табл. 2). В спектрах ГК для целинной каштановой почвы в интервале 45-60 ppm обнаруживается выраженный пик на уровне 55.703 ppm, который связан с присутствием углерода в аминогруппах и метоксильной группе $-\text{O}-\text{CH}_3$, их содержание составляет $7.9\pm 0.14\%$. В пахотных каштановых почвах этот показатель почти вдвое меньше по сравнению с целинными.

Анализ площадей пиков в интервале 160-185 ppm позволил определить долю углерода, относящегося к карбоксильным группам, которая составляет $15.5 \pm 0.42\%$ в пахотных каштановых почвах, а на целинных почвах – $12.55 \pm 0.92\%$.

Установлено, что в исследуемых пахотных почвах доля ароматических компонентов выше, чем в целинных. Эта разница свидетельствует о существенном влиянии сельскохозяйственной обработки на структуру гуминовых кислот. Казалось бы, вспашка должна способствовать процессам минерализации и трансформации органического вещества, приводя к снижению содержания ароматических соединений. Однако полученные нами данные свидетельствуют об обратном. Это объясняется тем, что при деструкции органического материала наиболее быстро отщепляются алифатические группировки и остаются ароматические структурные фрагменты с более высоким содержанием углерода. Это свидетельствовало о повышении доли ароматических структур в гуминовых кислотах при истощении почвы углеродом и элементами питания (Завьялова и др., 2022).

Различие в химических сдвигах между 100 и 165 ppm, характерное для ароматических углеродных атомов в пахотных и целинных почвах, возможно, связано с различиями в заместителях на ароматических кольцах. Это, в свою очередь, зависит от условий землепользования и скорости трансформации органического вещества (рис. 2).

Анализ содержания хиноидных компонент показывает, что наибольшая доля углерода, заключенного в этих структурах, присутствует в образце ГК каштановой пашни (табл. 2).

Помимо упомянутых выше соотношений значимым свойством гуминовых кислот является баланс между их гидрофильными и гидрофобными компонентами. Гидрофильные элементы включают кислородсодержащие функциональные группы, такие фрагменты, как C=O, COOH и SalkO, тогда как гидрофобные части состоят из C- и замещенных ароматических и алкильных фрагментов, а также гуминовых кислот. Доля гидрофильных компонентов в гуминовых кислотах каштановых почв, определяющая их реакционную способность, варьирует от 41 до 46%.

Исследование спектров ¹³C-ЯМР позволяет сделать вывод о характерных особенностях структуры гумусовых кислот пахотных и целинных каштановых почв Забайкалья. Так, в ГК пахотных почв алифатический углерод выражен менее ярко, что указывает на более значительное участие ароматического углерода в их макромолекулярной структуре. Ароматический углерод, в отличие от алифатического, представляет собой углерод в структуре с ароматическими кольцами, такими как бензольные. Такие структуры обычно более стабильны и устойчивы к микробиологическому разложению, что может влиять на физические и химические свойства почвы. Более выраженная роль ароматического углерода может свидетельствовать о накоплении более стабильного гумуса и о способности почвы сохранять питательные вещества и влагу. Это может иметь важные последствия для плодородия почвы.

Прослеживается закономерность: в пашне алифатичность ниже, чем на целине. Таким образом, сельскохозяйственная обработка почвы трансформирует молекулярную структуру ГК, что проявляется в увеличении доли ароматического углерода в пахотных почв.

Закономерности в изменении химического состава ГК, такие как алифатичность, могут быть обусловлены различными факторами, включая агрономические практики, биологическую активность и химические свойства почв.

На пашне алифатичность может быть ниже по следующим причинам:

1. Регулярная вспашка и обработка почвы может приводить к более быстрому разложению органического вещества и потере более легких алифатических фракций.
2. Измененные условия на пашне могут приводить к изменению в сообществе почвенных микроорганизмов, которые разлагают алифатические соединения.

На целине, напротив, почва обычно подвергается меньшему антропогенному воздействию. Здесь может сохраняться больше разнообразного органического материала, включая алифатические соединения в составе ГК.

Изменение условий почвообразования в сторону постепенного повышения температуры и снижения влажности связано с увеличением конденсированности ГК. Направление процесса зависит не только от изменения климатических условий, но и от химических и биологических факторов: реакции среды, состава органических остатков, типа землепользования.

В элементном составе ГК пахотных каштановых почв Забайкалья содержание углерода выше,

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ариунушкина Е.А.* 1970. Руководство по химическому анализу почв М.: Изд-во Московского университета. 487 с.
- Бажга С.Н., Андреев А.В., Богданов Е.А., Данжалова Е.В., Дробышев Ю.И., Петухов И.А., Рупышев Ю.А., Убугунова В.И., Цыремпилов Э.Г., Хадбаатар С., Иванов Л.А.* 2021. Причинно-следственный анализ деградации экосистем бассейна Байкала на основе долговременного мониторинга сети модельных полигонов // *Аридные экосистемы*. Т. 27. № 2 (87). С. 12-25. [*Bazha S.N., Andreev A.V., Bogdanov E.A., Danzhalova E.V., Drobyshev Yu.I., Petukhov I.A., Rupyshev Yu.A., Ubugunova V.I., Ivanov L.A., Khadbaatar S., Tsyrempilov E.G.* 2021. Analysis of the Cause and Effect of Ecosystem Degradation in the Lake Baikal Basin Based on Long-Term Monitoring in the Network of Model Polygons // *Arid Ecosystems*. Vol. 11. No. 2. P. 124-134.]
- Бажга С.Н., Андреев А.В., Богданов Е.А., Данжалова Е.В., Петухов И.А., Рупышев Ю.А.* 2022. Пространственная база данных экосистем бассейна оз. Байкал // *Аридные экосистемы*. Т. 28. № 3 (92). С. 14-22. [*Bazha S.N., Andreev A.V., Bogdanov E.A., Danzhalova E.V., Petukhov I.A., Rupyshev Yu.A.* 2022. A Spatial Database of Ecosystems of the Lake Baikal Basin // *Arid Ecosystems*. Vol. 12. No. 3. P. 243-250.]
- Биологическое разнообразие Тугнуйской котловины. 2002 / Ред. В.М. Корсунов, Б.Б. Намсараев. Улан-Удэ. 160 с.
- Болданов Т.А., Мухин Г.Д.* 2019. Экологическая адаптация сельскохозяйственного землепользования в условиях изменения климата в Республике Бурятия // *Аридные экосистемы*. Т. 25. № 1 (78). С. 10-19. [*Boldanov T.A., Mukhin G.D.* 2019. Ecological Adaptation of Agricultural Land Use under Climate Change in the Republic of Buryatia // *Arid Ecosystems*. Vol. 9. No. 1. P. 7-14.]
- Ганжара Н.Ф., Борисов Б.А., Байбеков Р.Ф.* 2002. Практикум по почвоведению. М.: Агроконсалт. 280 с.
- Девятова Т. А., Щеглов Д. И., Щербаков А. П., Артюхов В.Г.* 2004. Антропогенная трансформация черноземов центра Русской равнины // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия «Химия. Биология. Фармация»*. № 2. С. 128-134.
- Завьялова Н.Е., Васбиева М.Т., Фомин Д.С.* 2022. Элементный состав и структура гуминовых кислот дерново-подзолистой почвы длительного стационарного опыта и ее целинных аналогов // *Агрохимия*. № 9. С. 15-25.
- Запханов Ю.Д.* 2016. Почвенно-климатические условия и динамика плодородия пахотных почв Республики Бурятия // *Достижения науки и техники АПК*. Т. 30. № 10. С. 77-80.
- Караваева Н.А.* 2005. Агрогенные почвы: условия среды, свойства и процессы // *Почвоведение*. № 12. С. 1518-1529.
- Наумова Н.Б.* 1993. Формирование биомассы почвенных микроорганизмов в ходе первичной сукцессии // *Сукцессии и биологический круговорот*. Новосибирск: Наука. С. 44-52.
- Ногина Н.А.* 1964. Почвы Забайкалья. М.: Наука. 314 с.
- Орлов Д.С., Гришина Л.А.* 1981. Практикум по химии гумуса. М.: Изд-во МГУ. 271 с.
- Русанов А.М.* 2003. Перспективы сохранения и восстановления свойств и экологических функций почв сельскохозяйственного назначения // *Экология*. № 1. С. 12-17.
- Трофимова И.Е., Балыбина А.С.* 2024. Климатическая обусловленность современного развития островных степей юга Восточной Сибири // *Аридные экосистемы*. Т. 30. № 2 (90). С. 12-23. [*Trofimova I.E., Balybina A.S.* 2024. The Role of Climate in Shaping the Modern-Day Evolution of Insular Steppes of Southeastern Siberia // *Arid Ecosystems*. Vol. 14. No. 2. P. 149-158.]
- Холодов В.А., Константинов А.И., Кудрявцев А.В., Перминова И.В.* 2011. Строение гуминовых кислот почв зонального ряда по данным спектроскопии ЯМР¹³C // *Почвоведение*. № 9. С. 1064-1073.
- Чуков С.Н., Лодыгин Е.Д., Абакумов Е.В.* 2018. Использование ¹³C ЯМР-спектроскопии в исследовании органического вещества почв (обзор) // *Почвоведение*. № 8. С. 952-964.
- Щеглов Д.И.* 2003. Черноземы центральных областей России: современное состояние и направление эволюции // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия «Химия. Биология. Фармация»*. № 2. С. 187-195.
- Якутин М.В.* 1997. Изменение режимов функционирования почвенной микробиомассы под влиянием разнотипного сельскохозяйственного использования серой лесной почвы // *Почвенные ресурсы, рационализация землепользования и экологическая оптимизация агроландшафтов в Приенисейской Сибири: Материалы конференции*. Красноярск. С. 70-72.
- Weber J., Jamroz E., Mielnik L., Spaccini R., Kocowicz A., Cwielag-Piasecka I., Jerzykiewicz M., Parylak D., Debicka M.* 2024. Changes in Soil Humin Macromolecular Structure Resulting from Long-Term Catch Cropping // *Molecules*. Vol. 29. P. 5049.
- Zhang C., Qiao Y., Song Q.* 2024. Practice of Improving Saline-Alkali Soil with Bio-Humic Acid // *Processes*. Vol. 12. P. 1250.
- Yuxin K., Xing Z., Yuhang R., Xiaoli Z., Shaocheng S., Bing K., Ziyue Z., Junqiang W., Baoshou S.* 2024. Remediation of polycyclic aromatic hydrocarbons polluted soil by biochar loaded humic acid activating persulfate: Performance,

- process and mechanisms // *Bioresource Technology*. Vol. 399. P. 130633.
- Tan K.H., Nopamornbodi V. 1979. Effect of different levels of humic acids on nutrient content and growth of corn (*Zea mays* L.) // *Plant Soil*. Vol. 51. P. 283-287.
- Li T., Song F., Zhang J., Liu S., Xing B., Bai Y. 2020. Pyrolysis characteristics of soil humic substances using TG-FTIR-MS combined with kinetic models // *Science of the Total Environment*. Vol. 698. P. 134237.
- Zhou L., Chu J., Zhang Y., Wang Q., Liu Y., Zhao B. 2024. Impact of a Single Lignite Humic Acid Application on Soil Properties and Microbial Dynamics in Aeolian Sandy Soils: A Fourth-Year Study in Semi-Arid Inner Mongolia // *Agronomy*. Vol. 14. P. 2581.
- Karakurt Y., Unlu H., Unlu H., Padem H. 2009. The influence of foliar and soil fertilization of humic acid on yield and quality of pepper // *Acta Agriculturae Scandinavica. Section B. Soil and Plant Science*. Vol. 59. P. 233-237.
- Ellerbrock E.H., Hohn A., Gerke H.H. 2001. Land Use Effects on Soil Organic Matter Composition – A Method for Functional Group Analysis // *Understanding and Managing Organic Matter in Soils, Sediments, and Waters*. Adelaide, Australia: International Humic Substances Society, Hyde Park Press. P. 263-268.
- Debicka M. 2024. The Role of Organic Matter in Phosphorus Retention in Eutrophic and Dystrophic Terrestrial Ecosystems // *Agronomy*. Vol. 14. P. 1688.
- Lodygin E., Abakumov E. 2024. The Use of Spectroscopic Methods to Study Organic Matter in Virgin and Arable Soils: A Scoping Review // *Agronomy*. Vol. 14. P. 1003.
- Ma L., Xiao B. 2023. Characteristic of Molecular Weight-Fractions of Soil Organic Matter from Calcareous Soil and Yellow Soil // *Sustainability*. Vol. 15. P. 1537.
- Sukhoveeva O.E., Zolotukhin A.N., Karelin D.V. 2020. Climate-induced changes in organic carbon stocks in arable chernozems of the Kursk Region // *Arid Ecosystems*. Vol. 10. No. 2 (83). P. 72-79. [Суховеева О.Э., Золотухин А.Н., Карелин Д.В. 2020. Климатообусловленные изменения запасов органического углерода в пахотных черноземах Курской области // *Аридные экосистемы*. Т. 26. № 2 (83). С. 72-79.]
- Gorbov S.N., Bezuglova O.S. 2013. Elemental composition of humic acids in soils of urbanized territories (on the example of Rostov-on-Don) // *Soil Science*. No. 11. P. 1316-1324.
- Ciavatta C., Centemero M., Toselli M., Zaccone C., Senesi N. 2022. Compost Production, Analysis and Applications in Agriculture // *Multi-Scale Biogeochemical Processes in Soil Ecosystems*. Hoboken, NJ, USA: Wiley. P. 297-321.
- Audette Y., Congreves K.A., Schneider K., Zaro G.C., Nunes A.L.P., Zhang H., Voroney R.P. 2022. The effect of agroecosystem management on the distribution of C functional groups in soil organic matter: A review // *Biology and Fertility of Soils*. Vol. 57. P. 881-894.
- Mohammed I., Kodaolu B., Zhang T., Wang Y., Audette Y., Longstaffe J. 2023. Analysis of Molecular Structure Changes in Humic Acids from Manure-Amended Soils over 17 Years Using Elemental Analysis and Solid-State ¹³C Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy // *Soil Systems*. Vol. 7. P. 76.
- Visser S.A. 1983. Application of Van Krevelen's Graphical-Statistical Method for the Study of Aquatic Humic Material // *Environmental Science & Technology*. Vol. 17. P. 412-417.
- Schnitzer M., Monreal C.M. 2011. Quo vadis soil organic matter research? A biological link to the chemistry of humification. San Diego, CA, USA: Elsevier Academic Press Inc. P. 139-213.
- Song G., Simpson A.J., Hayes M.H.B. 2023. Compositional Changes in the Humic Fraction Resulting from the Long Term Cultivation of an Irish Grassland Soil: Evidence from FTIR and Multi-NMR Spectroscopies // *Science of the Total Environment*. Vol. 880. P. 163280.
- Weisheng D., Yao W., Weijuan G., Guofu W., Muqing Q. 2024. Effects of Fe(II) and humic acid on U(VI) mobilization onto oxidized carbon nanofibers derived from the pyrolysis of bacterial cellulose // *International Journal of Biological Macromolecules*. Vol. 266. P. 131210.
- Dion D., Nautiyal C.Sh. 2023. Microbiology of extreme soil environments // *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Springer: Second Edition. P. 494-511.
- Hermans S.M., Buckley H.L., Case B.S., Curran-Cournane F., Taylor M., Lear G. 2020. Using soil bacterial communities to predict physico-chemical variables and soil quality // *Microbiome*. No. 8. P. 79.
- Naylor D., McClure R., Jansson J. 2022. Trends in Microbial Community Composition and Function by Soil Depth // *Microorganisms*. No. 10 (3). P. 540.
- Xue P.P., Carrillo Y., Pino V., Minasny B., McBratney A.B. 2018. Soil Properties Drive Microbial Community Structure in a Large Scale Transect in South Eastern Australia // *Scientific Reports*. No. 8. P. 11725.