

УДК 631:4

## ЛИПИДНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ПОЧВ СУХОСТЕПНЫХ ЛАНДШАФТОВ СЕЛЕНГИНСКОГО СРЕДНЕГОРЬЯ

© 2022 г. Е. П. Никитина<sup>1,\*</sup>, Е. Ц. Пинтаева<sup>1</sup>, Л. Д. Раднаева<sup>1</sup>,  
Л. Б. Буянтуева<sup>2</sup>, академик РАН А. К. Тулохонов<sup>1</sup>

Поступило 18.05.2022 г.

После доработки 30.05.2022 г.

Принято к публикации 02.06.2022 г.

Липидные компоненты представляют собой важную составляющую органических остатков, поступающих в почву, и часто используются в качестве биомаркеров для исследования происхождения и эволюции органического вещества почвы. Впервые методом газо-хромато-масс-спектрометрии определен состав основных липидных компонент (жирные кислоты, жирные спирты, гидроксикислоты и др.) в почвах сухостепных ландшафтов Селенгинского среднегорья. По количественному содержанию липидных маркеров определено общее микробное число прокариот. Показано, что верхние гумусовые горизонты почв характеризуются наибольшим содержанием липидных компонент (351.6–842.5 мкг/г) и численностью прокариот ( $7.1–35.6 \times 10^6$  кл/г) относительно нижних. Выявлены значимая прямая корреляция содержания липидных компонент и численности прокариот с содержанием органического углерода и обратная с глубиной залегания почвенных горизонтов. Полученные данные распределения маркеров растительного и бактериального источников органического вещества указывают на значимый вклад подземной и микробной биомассы в органический углерод почв, особенно в верхних горизонтах. Кроме того, достаточно высокие значения индекса четности углерода указывают на медленные темпы деструкции поступающих органических остатков в исследуемых почвах.

*Ключевые слова:* Селенгинское среднегорье, каштановые почвы, липидные компоненты

**DOI:** 10.31857/S268673972260076X

### ВВЕДЕНИЕ

Селенгинское среднегорье расположено в пределах Западного Забайкалья и занимает среднюю часть бассейна р. Селенга. Внутриконтинентальное положение региона и расчлененный характер рельефа определяют резкую и частую пространственную изменчивость климата, который в целом характеризуется континентальностью и ярко выраженной засушливостью [1]. Здесь, на южных склонах межгорных понижений, подгорных шлейфах сопок, нижней части хребтов и террасовидных повышениях формируются сухостепные ландшафты с преобладанием каштановых почв [2]. Данные почвы имеют легкий гранулометрический состав и почти повсеместно подвержены дефляции [3]. Являясь самыми теплообеспеченными почвами региона, они характеризуются ма-

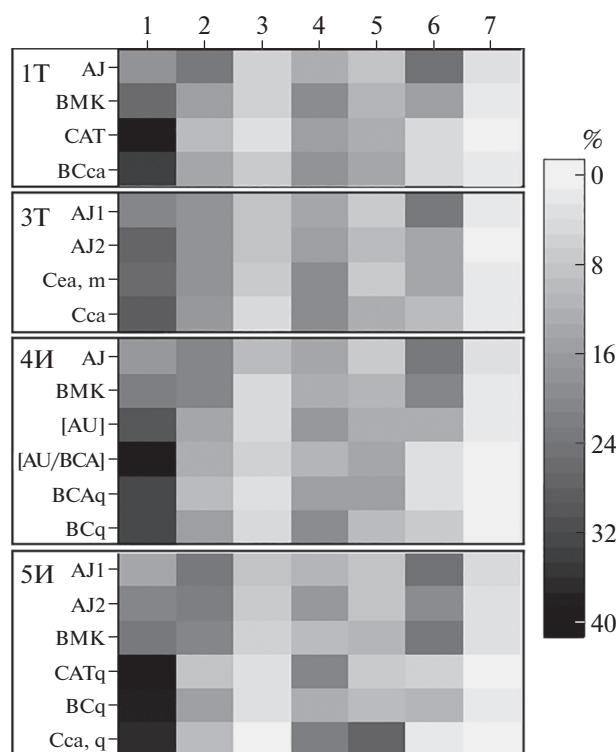
лой мощностью гумусового горизонта, щебнистостью, слабой водоудерживающей способностью и низкой влагоемкостью, что отличает их от типичных каштановых суглинистых почв Европейской части России [4]. Отношение надземной фитомассы к подземной в каштановых почвах Забайкалья гораздо ниже и на долю корневой системы приходится по оценкам разных авторов от 88 до 97% от общих запасов фитомассы, большая часть которой сконцентрирована в верхнем 0–20 см слое [5, 6]. Все вышеперечисленное влияет на биологическую активность почвы и скорость деструкционных процессов органического вещества [3].

Неспецифические органические вещества почв, в частности липидные компоненты, образуются при деструкции растительных и, в меньшей степени, животных остатков, микробной биомассы [9, 10]. В настоящее время они часто используются в качестве маркеров для исследования происхождения и путей трансформации органического вещества в почве [7, 8]. По сравнению с другими органическими соединениями они обладают относительно более высокой устойчивостью к внешним воздействиям, что обуславливает от-

<sup>1</sup> Байкальский институт природопользования  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
Улан-Удэ, Россия

<sup>2</sup> Бурятский государственный университет  
им. Доржи Банзарова, Улан-Удэ, Россия

\*E-mail: lenauude@mail.ru



**Рис. 1.** Состав основных липидных компонент по профилям исследуемых почв (в %). 1 – КНЖК; 2 – ДНЖК; 3 – разветвленные ЖК; 4 – МНЖК; 5 – жирные спирты; 6 – гидроксикислоты; 7 – дикарбоновые кислоты.

носительную стабильность их содержания и надежную идентификацию в естественных почвах [11]. Кроме того, широкий спектр липидных молекул используется в качестве биомаркеров функционального разнообразия почвы и почвенной биоты [8, 12]. Таким образом, целью данной работы было исследование липидных компонентов как биомаркеров органического вещества в почвах сухостепных ландшафтов Селенгинского среднегорья.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования послужили образцы почв, формирующихся в пределах сухостепной зоны Селенгинского среднегорья. Исследования проводились методом ключевых участков. Первый ключевой участок располагался в западной части Тугнуйской котловины в основании южного склона хребта Цаган-Дабан, где были диагностированы каштановая типичная (1Т; AJ–BMK–CAT–BCca) и светлогумусовая (3Т; AJ1–AJ2–Cca,m–Cca) почвы. Второй ключевой участок был заложен в подножии юго-западного склона хребта Хамар-Дабан на контакте с Иволгинской котловиной, где были вскрыты каштановая с погребенным профилем чернозема гидрометаморфизированного (4И; AJ–BMK–[AU]–[AU/BCA]–BCAq–BCq) и каш-

тановая квазиглеевая (5И; AJ1–AJ2–BMK–CATq–BCq–Cca,q) почвы. Исследуемые почвы формировались под ковыльно-разнотравными сообществами с довольно низким проективным покрытием (20–45%), в которых наибольшая фитоценотическая роль принадлежала многолетним дерновинным злакам *Stipa krylovii* Roshev, *Cleistogenes sguarrosa* (Trin.) Keng, *Agropyron cristatum* (L.), *Poa attenuate* Trin. Вторыми по фитоценотической значимости выступали растения, относящиеся к степному ксерофитному разнотравью – *Artemisia frigida* (Willd.), *Potentilla acaulis* L., *Potentilla bifurca* L.

Отбор почвенных образцов проводили согласно генетическим горизонтам в конце июля 2020 г. Содержание органического углерода было определено по методу Тюрина [13]. Липидные компоненты были проэкстрагированы методом кислого метанолиза в растворе HCl/метанол в течение одного часа при 80°C [14]. Процентный состав смеси вычисляли по площади газо-хроматографических пиков. Качественный и количественный анализ липидных компонент был основан на сравнении времен удерживания и полных масс-спектров соответствующих чистых соединений с использованием библиотеки данных NIST14 и стандартных смесей Bacterial Acid Methyl Esters (CP Mix, Supelco, Bellefonte, PA, USA) и Fatty Acid Methyl Esters (FAME Mix 10 мг/мл в CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>,

Supelko), а также по количеству введенного стандарта (дейтерометиловый эфир тридекановой кислоты). Расчет общей микробной численности (ОМЧ) проводили согласно Верховцевой, Осипову [15]. Индекс четности углерода рассчитывали согласно Wiesenberg et al. [16].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате работы было идентифицировано от 58 до 93 соединений в зависимости от глубины залегания горизонта. Основными компонентами липидной фракции были насыщенные и мононенасыщенные жирные кислоты, жирные спирты, гидроксикислоты (рис. 1). В небольших количествах в липидной фракции были также обнаружены дикарбоновые кислоты, альдегиды и стерины. Процентное содержание короткоцепочечных насыщенных (КНЖК) и мононенасыщенных (МНЖК) жирных кислот, а также жирных спиртов с глубиной имело тенденцию к увеличению. В то время как содержание длинноцепочечных (ДНЖК) и разветвленных жирных кислот, гидроксикислот уменьшалось.

Общее содержание липидов в исследуемых почвах имело регрессионный характер. Максимальные значения были отмечены в верхних гумусовых горизонтах (351.6–842.5 мкг/г), в подповерхностных горизонтах их количество уменьшалось в два–три раза (рис. 2). С помощью метода масс-спектрометрии микробных маркеров было рассчитано общее микробное число (ОМЧ). Наибольшие показатели численности прокариот были обнаружены в верхних почвенных горизонтах ( $7.1\text{--}35.6 \times 10^6$  кл/г), резко снижаясь с глубиной. При сравнении результатов содержания липидных компонент и ОМЧ между разными почвенными профилями существенные различия отмечены только в поверхностных горизонтах исследуемых почв. Наибольшими значениями вышеуказанных показателей характеризовался А11-горизонт каштановой квазиглеевой почвы, что, вероятно, обусловлено более благоприятным водным режимом почвы и достаточно высоким содержанием Сорг. Наименьшее содержание липидов и ОМЧ отмечено в А11-горизонте неполнопрофильной светлогумусовой почвы. Была выявлена значимая прямая корреляция содержания липидных компонент и ОМЧ с содержанием органического углерода ( $r = 0.78$  и  $r = 0.86$ ,  $p < 0.05$ ) и обратная с глубиной залегания почвенных горизонтов ( $r = -0.74$  и  $r = -0.80$ ,  $p < 0.05$ ).

Во всех образцах исследуемых почв обнаружено большое количество коротко- и длинноцепочечных насыщенных жирных кислот в диапазоне от С9 до С30, среди которых НЖК с четным числом атомов углерода сильно преобладали над НЖК с нечетным. Содержание ДНЖК в верхних горизонтах варьировало от 64.5 до 198.1 мкг/г, с

преобладанием тетракозановой и докозановой кислот. Содержание КНЖК было несколько меньше и составляло 71.0–125.0 мкг/г. Поскольку ДНЖК имеют растительное происхождение [9, 10], в верхних горизонтах почв, куда поступает растительный опад и сконцентрирована основная масса корней, ДНЖК преобладали над КНЖК. С глубиной содержание обеих групп резко уменьшалось, а также изменялось их соотношение – уже в подповерхностных горизонтах начинали преобладать КНЖК с доминирующими гексадекановой и октадекановой кислотами. Скорее всего это связано с изменением основных источников поступления органических веществ – вероятно в более глубоких слоях почвы они представлены корневыми остатками и микробной биомассой, в которых преобладают КНЖК [7].

Для оценки степени деградации органического вещества используют индекс четности углерода ( $СРI_{ЖК}$ ): значения, близкие к единице, указывают на сильно деградированные органические остатки, значения больше двух соответствуют свежей и/или хорошо сохранившейся биомассе [16]. Для исследуемых почв в целом отмечены высокие значения  $СРI_{ЖК}$  (3.9–7.5), которые согласуются с ранее полученными выводами о медленных темпах деструкции органических остатков в каштановых почвах Забайкалья [3]. При этом, согласно полученным значениям  $СРI_{ЖК}$ , гумусовые горизонты исследуемых почв характеризуются более активными процессами деструкции органического вещества, по сравнению с остальным почвенным профилем.

Содержание разветвленных жирных кислот *изо-/антеизо-С13:0 – С19:0* и *10-Ме-С16:0* варьировало от 32.2 до 70.9 мкг/г в верхних горизонтах, резко уменьшаясь вниз по профилю исследуемых почв. Среди вышеперечисленных жирные кислоты *изо-15:0*, *антеизо-15:0*, *изо-16:0*, *изо-17:0*, *антеизо-17:0* являются маркерами для грамположительных бактерий, 10-метилированные ЖК – специфическими для актиномицетов [11, 12]. Ненасыщенные жирные кислоты были представлены в основном изомерами гексадеценновой и октадеценновой кислот. Более высоким содержанием отличались 18:1 $\omega$ 9, которая является маркером высшей растительности [11] и 16:1 $\omega$ 7, 18:1 $\omega$ 7, являющиеся маркерами для грамотрицательных бактерий [12].

Обнаружены жирные спирты с углеродным числом в диапазоне от С12 до С28, с преобладанием 1-октадеканолола, 1-докозанолола и 1-тетракозанолола. Длинноцепочечные жирные спирты (>С21) превосходили по содержанию короткоцепочечные (<С21), особенно в верхних горизонтах. Считается, что длинноцепочечные жирные спирты с четным числом углерода являются маркерами восков листьев наземных высших растений, а короткоцепочечные, вместе с нечетными алканолола-

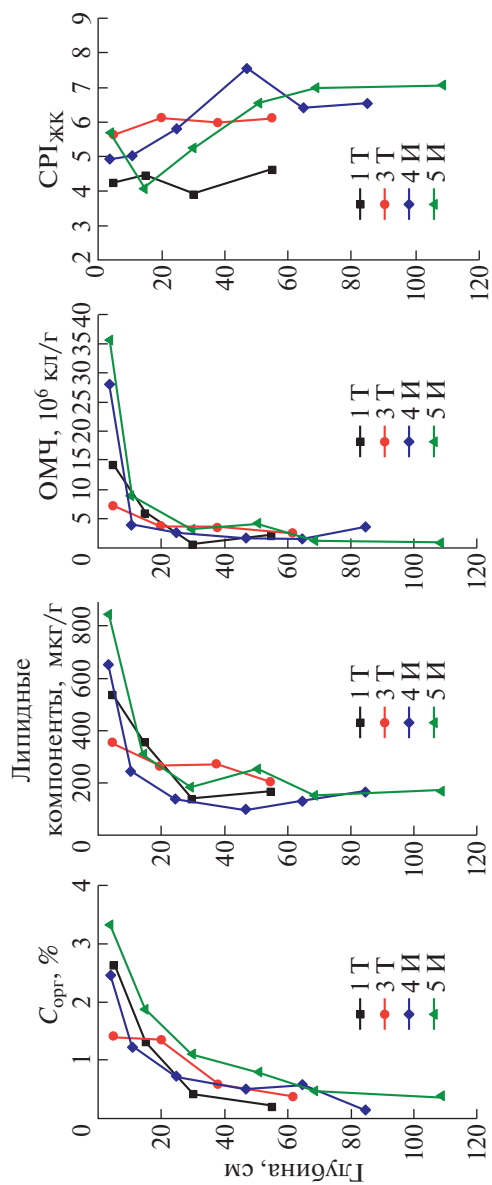


Рис. 2. Изменение содержания органического углерода, липидных компонент, общего микробного числа и индекса чётности углерода вдоль профиля исследуемых почв.

ми 15:0 ОН, С17:0 ОН, С19:0 ОН и С21:0 ОН, могут указывать на бактериальный вклад [8].

Содержание гидроксикислот в верхних горизонтах варьировало от 81.2 до 203.3 мкг/г, резко снижаясь вниз по профилю почв. Среди них преобладали 2h24:0 (до 71.5 мкг/г), ω-h24:0 (до 25.2 мкг/г) и ω-h22:0 (до 20.6 мкг/г). В небольших количествах были обнаружены дикарбоновые кислоты с длиной цепи С16–С22 и четным числом атомов (0.4–30.6 мкг/г). Преобладание среди ω-гидроксикислот длинноцепочечных и наличие дикарбоновых кислот указывает на значительный вклад корневой биомассы в почвенное органическое вещество, т.к. они являются типичными биомаркерами суберина [10, 17, 18].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследование липидных компонент в почвах сухостепных ландшафтов Селенгинского среднегорья показало значительное отличие верхних горизонтов от остального почвенного профиля. Полученные данные распределения жирных кислот, жирных спиртов, гидроксикислот и дикарбоновых кислот указывают на то, что органическое вещество верхних горизонтов состоит из наземного опада и корней с достаточно высоким вкладом микробной биомассы. Вниз по профилю идет резкое уменьшение содержания органических веществ, источником которых являются преимущественно корневые остатки и микроорганизмы. Кроме того, достаточно высокие значения  $СРI_{ЖК}$  указывают на медленные темпы деградации поступающих органических веществ в данных почвах.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую благодарность Ж.А. Тыхееву за помощь в проведении съемки образцов на газовом хроматографе.

### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № 075-15-2020-787 на реализацию крупного научного проекта “Основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической ситуации на Байкальской природной территории”).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батуев А.Р., Буянтуев А.Б., Снытко В.А. Геосистемы и картографирование эколого-географических ситуаций приселенгинских котловин Байкальского региона. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 164 с.
2. Убугунов Л.Л., Гынинова А.Б., Белозерцева И.А. и др. Разнообразие и закономерности пространственной организации почв бассейна оз. Байкал // Успехи современного естествознания. 2018. № 5. С. 142–151.
3. Чимитдоржиева Г.Д., Цыбикова Э.В. Своеобразие каштановых почв южных котловин Сибири // Аридные экосистемы. 2018. Т. 24. № 4 (77). С. 29–35.
4. Панкова Е.И., Черноусенко Г.И. Сопоставление каштановых почв Центральной Азии с их аналогами в других почвенно-географических провинциях сухостепной зоны суббореального пояса Евразии // Аридные экосистемы. 2018. Т. 24. № 2 (75). С. 13–22.
5. Меркушева М.Г., Аненхонов О.А., Бадмаева Н.К., Сосорова С.Б. Степные сообщества на каштановых почвах Западного Забайкалья: разнообразие и биопродуктивность // Аридные экосистемы. 2014. Т. 20. № 3(60). С. 59–69.
6. Лаврентьева И.Н., Меркушева М.Г., Убугунов Л.Л. Оценка запасов органического углерода и потоков  $CO_2$  в травяных экосистемах Западного Забайкалья // Почвоведение. 2017. № 4. С. 29–44.
7. Angst G., John S., Mueller C.W., et al. Tracing the Sources and Spatial Distribution of Organic Carbon in Subsoils Using a Multi-biomarker Approach // Scientific Reports. 2016a. 6:29478. P. 1–12.
8. Atanassova I., Harizanova M., Banov M. Free Lipid Biomarkers in Anthropogenic Soils // In: Soil Health Restoration and Management, Ed. R.S. Meena. Singapore: Springer, 2020. P. 321–355.
9. Kögel-Knaber I. The Macromolecular Organic Composition of Plant and Microbial Residues as Inputs to Soil Organic Matter // Soil Biology and Biochemistry. 2002. № 34. P. 139–162.
10. Otto A., Shunthirasingham C., Simpson M.J. A Comparison of Plant and Microbial Biomarkers in Grassland Soils from the Prairie Ecozone of Canada // Organic Geochemistry. 2005. V. 36. № 3. P. 425–448.
11. Розенцвет О.А., Федосеева Е.В., Терехова В.А. Липидные биомаркеры в экологической оценке почвенной биоты: анализ жирных кислот // Успехи современной биологии. 2019. Т. 139. № 2. С. 161–177.
12. Fang J., Dasgupta S., Zhang L., Zhao W. Lipid Biomarkers in Geomicrobiology: Analytical Techniques and Applications // In: Analytical Geomicrobiology. United Kingdom: Cambridge University Press, 2019. P. 341–359.
13. Практикум по агрохимии. Минеева В.Г. (ред.) М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. 689 с.
14. Pintaeva E.Ts. Lipid Biomarkers in Paleoreconstruction of Lake Sedimentogenesis // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 320. № 1. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/320/1/012016>
15. Верховцева Н.В., Осипов Г.А. Метод газовой хроматографии – масс-спектрометрии в изучении мик-

- робных сообществ почв агроценоза // Проблемы агрохимии и экологии. 2008. № 1. С. 51–54.
16. *Wiesenberg G.L.B., Andreeva D.B., Chimitdorgieva G.D., et al.* Reconstruction of Environmental Changes during the Late Glacial and Holocene Reflected in a Soil-sedimentary Sequence from the Lower Selenga River Valley, Lake Baikal Region, Siberia, Assessed by Lipid Molecular Proxies // *Quaternary International*. 2015. 365. P. 190–202.
17. *Kolattukudy P.E., Espelie K.E.* Chemistry, Biochemistry, and Function of Suberin and Associated Waxes // In: *Natural Products of Woody Plants*. Berlin; Heidelberg: Springer, 1989. P. 304–367.
18. *Angst G., Heinrich L., Kögel-Knabner I., Müller C.W.* The Fate of Cutin and Suberin of Decaying Leaves, Needles, Roots – Inference of the Initial Decomposition of Bound Fatty Acids // *Organic Geochemistry*. 2016. V. 95. P. 81–92.

## LIPID COMPONENTS OF THE SOILS IN DRY-STEPPE LANDSCAPES OF THE SELENGA MOUNTAINS

**E. P. Nikitina<sup>a,#</sup>, E. Ts. Pintaeva<sup>a</sup>, L. D. Radnaeva<sup>a</sup>,  
L. B. Buyantueva<sup>b</sup>, and Academician of the RAS A. K. Tulokhonov<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> *Baikal Institute of Nature Management, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Ulan-Ude, Russian Federation*

<sup>b</sup> *Banzarov Buryat State University, Ulan-Ude, Russian Federation*

<sup>#</sup> *E-mail: lenauude@mail.ru*

Lipid components are an important component of organic residues entering the soil and are often used as biomarkers to investigate the origin and evolution of soil organic matter. The composition of the main lipid components (fatty acids, fatty alcohols, hydroxyacids, etc.) in the soils of dry-steppe landscapes of the Selenga Mountains was determined using gas chromatography–mass spectrometry. According to the quantitative content of lipid markers, the total microbial count of prokaryotes was determined. It is shown that the upper humus horizons of soils are characterized by the highest content of lipid components (351.6–842.5 µg/g) and total microbial count ( $7.1–35.6 \times 10^6$  cell/g) relative to the lower. A significant direct correlation between the content of lipid components and the number of prokaryotes with soil organic carbon and the inverse correlation with the depth was revealed. The obtained data on the distribution of markers of terrestrial and bacterial sources of organic matter indicate a significant contribution of the underground and microbial biomass to total microbial count, especially in the upper horizons. In addition, rather high carbon preference index values indicate the slow rate of decomposition of organic residues in these soils.

*Keywords:* Selenga Mountains, chestnut soils, lipid components