

Высоко- и низкомолекулярные органические соединения в тундровых торфяниках

© 2015. Р. С. Василевич, к.б.н., н.с., Д. Н. Габов, к.б.н., с.н.с.,
В. А. Безносиков, д.с.-х.н., зав. лабораторией,
И. В. Груздев, к.х.н., с.н.с., Е. Д. Лодыгин, к.б.н., с.н.с.,
Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,
e-mail: vasilevich.r.s@ib.komisc.ru, gabov@ib.komisc.ru

Работа посвящена изучению особенностей состава гумусовых веществ и неспецифических органических соединений в тундровых бугристых торфяниках. Верхний слой торфа является биохимическим барьером, обладающим способностью сорбировать органические и органо-минеральные соединения. Проведено сопоставление экологических потенциалов гуминовых кислот почв тундровой и таёжной зон и тундровых бугристых торфяников. Гумусовые вещества бугристых торфяников обладают низким экологическим потенциалом, что свидетельствует о высокой восприимчивости органического вещества торфяных отложений к деградации и изменению экологических параметров окружающей среды. Специфические и неспецифические органические соединения бугристых торфяников в мерзлотных горизонтах находятся в законсервированном состоянии и не подвержены трансформации по сравнению с сезоннооттаивающим слоем. В случае изменения климата будет меняться верхняя граница многолетней мерзлоты, что приведёт к модификации количественных и качественных параметров органических соединений и включение новых слоев торфа в глобальный цикл углерода. Характерные спектры распределения карбоновых кислот, изучение различных их соотношений в сезоннооттаивающих слоях и многолетней мерзлоте торфяников возможно использовать в качестве маркеров (диагностических критериев) глобального изменения климата высоких широт.

The work examines the characteristics of humic substances and non-specific organic compounds in the tundra hummock peatlands. The upper peat layer serves a biochemical barrier and can sorb organic and organic-mineral compounds. The ecological potentials of soil humic substances from the tundra and taiga zones and tundra hummock peatlands were compared. Humic substances of hummock peatlands are of a low ecological potential and so evidence a high susceptibility of organic matter of peat deposits to degradation and change of environmental ecological parameters. Specific and unspecific organic compounds of hummock peatlands in permafrost soil horizons do not transform in contrast to active layer. In case of climate change, the upper permafrost border will also be changed and so modify qualitative and quantitative parameters of organic compounds and include new peaty layers into the global carbon cycle. Characteristic distribution spectra of carboxylic acids, their ratio in active and permafrost layers of peatlands can be markers (diagnostic criteria) of global climate change in high latitudes.

Ключевые слова: тундра, торфяник, гумусовые вещества, элементный состав, карбоновые кислоты, фенолы.

Keywords: tundra, peatland, humic substances, elemental composition, carboxylic acids, phenols.

Введение

В глубоких слоях многолетнемёрзлых пород, в которых хранится огромный объём многослойной информации о былых процессах, органическое вещество может сохраняться в реликтовой форме длительное время. В торфяных месторождениях северного полушария в районах многолетней мерзлоты законсервировано, по последним оценкам, 277 млрд т органического углерода [1]. Считается, что глобальные изменения климата, в первую очередь, коснутся высоких широт из-за по-

тенциального выброса большого количества парниковых газов от торфяных месторождений [2]. Становится всё более распространённым поиск маркеров глобального изменения климата. Причём некоторые авторы уже используют подход к реконструкции климата прошлого и условий окружающей среды в северных широтах с применением различных индикаторов химического и биологического происхождения [3–5]. Комплексная оценка трансформации специфических и неспецифических органических соединений позволит сделать значительный шаг к оценке устойчивости экологических

систем тундры, а по их изменению выявить влияние глобального потепления климата на их структурно-функциональные параметры.

Современные представления свидетельствуют о вариации состава и свойств гумусовых веществ (ГВ) с течением времени и под действием экологических факторов. Изменения условий окружающей среды, имеющие как сезонный характер, так и длительную временную динамику, связанную, например, с изменением климата, имеют последствия в изменении состава гумусовых веществ почв. Содержание функциональных групп и молекулярных ГВ торфа также зависит от его ботанического состава и от степени разложения исходных растительных остатков [6, 7].

Аккумуляция различных низкомолекулярных органических соединений в торфяниках, включающихся в общий круговорот углерода, может быть связана с почвообразовательными процессами (продукты деструкции гумусовых веществ могут являться природными источниками низкомолекулярных органических соединений), с антропогенными факторами вследствие того, что северные регионы индустриально развиты в плане добычи ископаемого топлива, а также возможно и с геохимическим фоном, в том числе – с утечкой и эрозией ископаемого углерода.

Фенолы – необходимые компоненты биологических и биокосных систем [8], принимают участие в гумусообразовании и в почвообразовательном процессе в целом, являясь одновременно и продуктом деструкции гумусовых веществ почвы, и исходным веществом в процессах гумификации [9]. В этом смысле фенол можно отнести к лабильным компонентам почвы, которые не накапливаются в ней в значительном количестве в ходе естественных процессов почвообразования, а значительные превышения фонового содержания фенола могут носить техногенный характер [10]. С другой стороны, он является высокотоксичным компонентом, способным оказывать ингибирующее действие на микрофлору и растительность, подобное накопление может приводить к деформации процесса почвообразования. Различные экологические, а также биологические проблемы, связанные с распадом растительных материалов, могут быть решены только при наличии информации о количестве содержащихся в почве фенолов, а также о характере их распределения по различным почвенным горизонтам.

Карбоновые кислоты также широко распространены в природе и являются важными питательными веществами и метаболитами

в живых организмах [11, 12]. Они являются основными строительными блоками для многих классов липидов почв, образуются в результате разложения и преобразования в специфических условиях органических остатков под влиянием растений, животных и микроорганизмов. С наличием карбоновых кислот связывают направление ряда важнейших почвообразовательных процессов. Органические кислоты широко используются как информативные маркеры для обнаружения присутствия различных групп почвенных микроорганизмов и определения структуры их сообществ, а также выявления изменений, связанных с химическим загрязнением почв.

Цель работы – определение структурно-функциональных параметров ГВ, изучение количественного и качественного состава фенолов и карбоновых кислот в тундровых бугристых торфяниках, выявление особенностей их накопления и миграции в зоне криогенеза, поиск возможностей их использования как маркеров глобального изменения климата.

Объекты исследований

Район исследования расположен в северной лесотундре (бассейн р. Сейды), в Воркутинском районе Республики Коми, с распространением массивно-островной многолетней мерзлоты. Территория представляет собой полого-увалистую равнину, покрытую чехлом покровных пылеватых суглинков, мощностью менее 10 м [13]. Климат умеренно континентальный, среднегодовая температура воздуха по метеостанции г. Воркуты – минус 5,8°C, среднесуточная сумма положительных температур – около 1000°C, среднегодовое количество осадков – 550 мм [14].

Исследования проведены в пределах плоскобугристо-мочажинного комплекса на сухоторфяных мерзлотных почвах бугров (разрез 13-Ж) и почвах «оголённых» торфяных пятен (разрез 12-Ж). Послойный отбор проб проведён до глубины 1,5 м. Торф по всей толще тёмно-коричневый, хорошо разложившийся, перегнойного типа. Растительный покров плоскобугристого торфяника представлен багульниково-мохово-лишайниковыми сообществами, по склонам бугров – карликовая берёза. Растительность на вершинах бугров нарушена – обнажается тёмно-коричневый торф под влиянием ветровой и морозной корразии, образуются «оголённые» пятна [15]. Верхняя граница многолетней мерзлоты находится на глубине 50–60 см. По всему

профилю преобладают гипновые мхи, ниже 80 см наблюдается увеличение доли осок и древесных остатков.

Методы исследований

Препараты гуминовых (ГК) и фульвокислот (ФК) выделены из образцов торфа по методике, рекомендованной Международным обществом по изучению гумусовых веществ IHSS [16]. Определение элементного состава гумусовых кислот выполнено на CNHS-анализаторе EA 1110 (Carlo-Erba, Италия) в соответствии с аттестованными методиками количественного химического анализа № 88-17641-94-2009, 88-17641-116-01.00076-2011. Значения массовой доли элементов в препаратах ГК и ФК пересчитаны с учётом массовой доли гигроскопической влаги и зольности. Аминокислотный состав 6 моль/дм³ НСl вытяжки установлен методом жидкостной хроматографии на ионообменных смолах (анализатор аминокислот ААА 339), согласно аттестованной методике КХА МВИ № 88-17641-97-2010.

Фенол из почвы извлекали дистиллированной водой, переводили в бромпроизводные и анализировали на газовом хроматографе «Хроматэк Кристалл 5000» с детектором электронного захвата, согласно аттестованной методике КХА МВИ № 88-17641-006-2013. Извлечение органических кислот из почвы проводили смесью органических растворителей при помощи ультразвуковой обработки. Затем получали силильные производные органических кислот, которые определяли на хромато-масс-спектрометре «Trace DSQ» (Thermo) в режиме полного ионного тока.

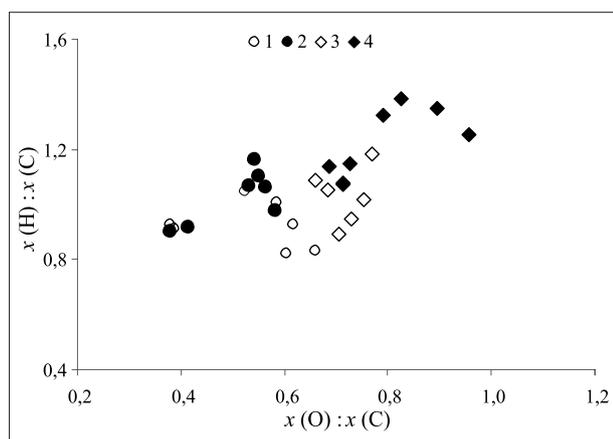


Рис. 1. Мольные отношения элементов $x(H) : x(C) - x(O) : x(C)$ в препаратах ГК разреза 12-Ж (1), ГК разреза 13-Ж (2), ФК разреза 12-Ж (3), ФК разреза 13-Ж (4).

Результаты и их обсуждение

Элементный состав гумусовых кислот – одна из важнейших характеристик, которая используется в качестве показателя уровня гумификации и степени окисленности гумусовых кислот, а также для оценки их конденсированности. Массовая доля углерода в ГК почв оголённых торфяных пятен составляет 50,1–60,8%, в ФК – 45,8–49,6% и сухоторфяных мерзлотных почв бугров 52,2–60,8%, в ФК – 41,1–48,8%. Более высокая обуглероженность гуминовых кислот по сравнению с фульвокислотами обусловлена отщеплением боковых цепей молекул с накоплением наиболее устойчивых конденсированных структур. На основании графико-статистического анализа элементного состава отмечаются близкие значения атомного соотношения $x(O) : x(C)$ для препаратов гуминовых кислот бугристых торфяников, приуроченных к верхним и центральным слоям торфяной толщи (рис. 1). Расположение ГВ на диаграмме позволяет отнести различия между препаратами за счёт неодинакового развития алифатических цепей и степени конденсированности ГК и ФК. Диагностируются значительные отличия $x(H) : x(C)$ препаратов ГК и ФК, относящихся к различным слоям торфа. Особую область на диаграмме занимают препараты ГВ, относящиеся к горизонтам на границе многолетней мерзлоты и нижним горизонтам. По данным степени окисленности и атомного соотношения $x(O) : x(C)$ ГК и ФК нижних слоёв представлены восстановленными молекулами, что обусловлено более низким содержанием кислородсодержащих функциональных групп. Накопление биотермодинамически устойчивых фрагментов ГК на глубине 20–60 см и ФК на глубине 20–40 см почв оголённых торфяных пятен предположительно обусловлено динамическими процессами оттаивания и замерзания на границе многолетней мерзлоты (рис. 2). Отсутствие мохового термоизолирующего покрова почв оголённых мерзлотных пятен способствует более резкому градиенту температур в периоды наступления метеорологической зимы и лета. По мнению ряда исследователей, динамические процессы приводят к отщеплению от молекул ГК и ФК наименее конденсированных молекулярных фрагментов, вследствие чего растёт доля ФК.

Отношение $x(H) : x(C)$ указывает на конденсированность и зрелость молекул ГВ. Установлено уменьшение мольного соотношения $x(H) : x(C)$ для ГК по профилю почв

оголённых торфяных пятен с 1,05 до 0,83 и сухоторфяных мерзлотных почв бугров с 1.16 до 0.90, что обусловлено естественным отбором биотермодинамически устойчивых молекулярных структур и определяет большую степень гумификации органического вещества нижних слоёв торфа (рис. 2).

Уменьшение атомного отношения $x(H) : x(C)$ по профилю связано с изменением ботанического состава торфа и увеличением доли травянистой растительности на глубине от 60 см и остатков древесной растительности в нижних торфяных горизонтах. Степень гумификации органического вещества в большей степени связана с температурными режимами почв в тёплый период года. Сухоторфяные почвы бугров вследствие буферного действия моховой подстилки хуже прогреваются в летний период. Вероятно, именно этим обусловлена меньшая конденсированность молекул ГК и ФК торфяных горизонтов до верхней границы многолетней мерзлоты.

Сопоставление данных по содержанию кислорода и степени окисленности ГВ бугристых торфяников с данными для минеральных почв тундровой зоны [17] показало, что ГК и ФК торфяников представлены более восстановленными молекулами. Анаэробные условия почвообразования в бугристых торфяниках также определяют более низкое содержание кислорода и $x(O) : x(C)$ фульвокислот. Атомные отношения $x(O) : x(C)$ для фульвокислот бугристых торфяников значительно ниже, чем в минеральных почвах Большеземельской тундры (0.85–1.71). Это определяет более низкие растворимость и реакционную способность ФК по отношению к тяжёлым металлам.

Аминокислотные (АК) фрагменты являются важными структурными компонентами

гумусовых веществ. Одним из основных источников АК в почве и гумусовых веществ являются растительные остатки. Состав и количество аминокислотных фрагментов характеризуют степень полимеризации органического вещества, отражая различные уровни биологической активности почв [18]. Аминокислотный состав гумусовых кислот часто используется в виде маркеров, отражающих изменения параметров окружающей среды, обусловленных влиянием как природных, так и антропогенных факторов [19, 20].

В гидролизатах гуминовых и фульвокислот бугристых торфяников идентифицированы 15 аминокислот (рис. 3). Накопление аминокислотных фрагментов в составе гумусовых веществ по профилю торфяной залежи имеет бимодальный характер. Массовая доля АК фрагментов в сухом веществе ГВ уменьшается по профилю почв оголённых мерзлотных пятен: для ГК от 8,6 до 3,6%, для ФК от 4,7 до 1,4% и сухоторфяной мерзлотной почвы бугров: для ГК от 8,6 до 5,5%, для ФК от 4,9 до 3,4%. В нижних слоях торфа содержание аминокислотных фрагментов ГВ резко увеличивается.

Данные по изменению содержания аминокислотных фрагментов в составе гидролизной части молекул ГВ по профилю тундровых торфяников согласуются с результатами элементного состава ГВ и свидетельствуют об уменьшении содержания общего азота и азота в составе олиго- и полипептидных фрагментов молекул. Совокупность параллельно протекающих процессов: минерализация лабильных аминокислотных фрагментов молекул, активное участие в качестве доступного азота для питания микроорганизмов, а также взаимодействие данных фрагментов с фенольными группами ядерной части молекул приводит к

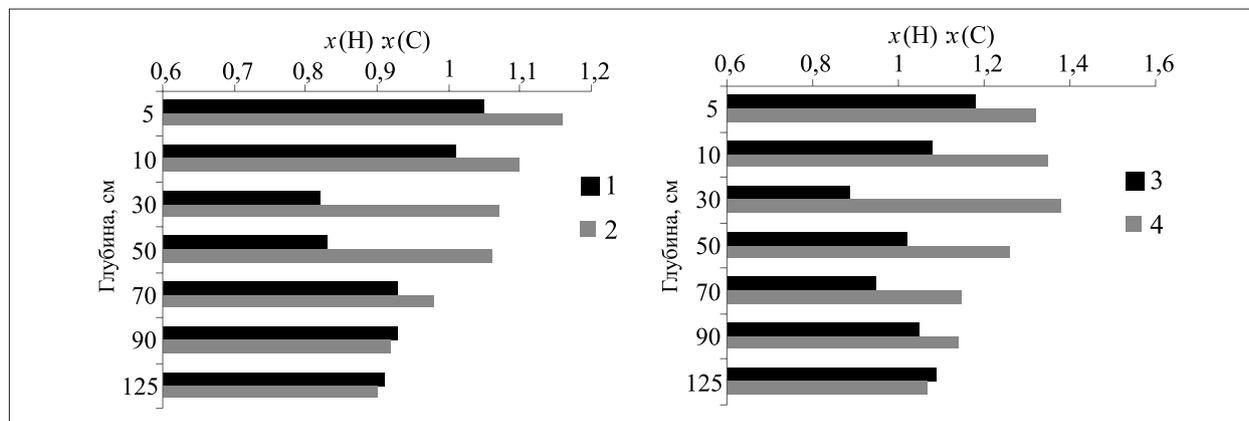


Рис. 2. Мольные отношения элементов $x(H) : x(C)$ в препаратах ГК разреза 12-Ж (1), ГК разреза 13-Ж (2), ФК разреза 12-Ж (3), ФК разреза 13-Ж (4).

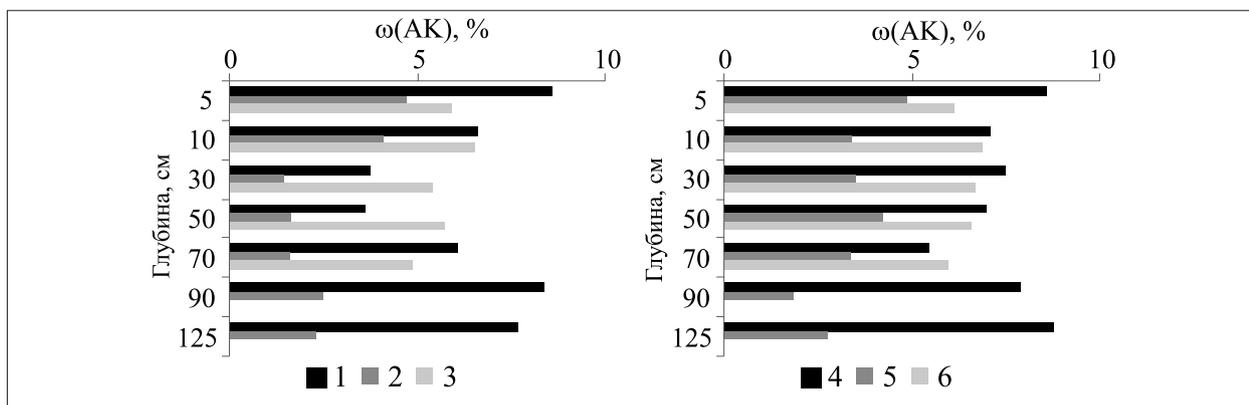


Рис. 3. Массовая доля аминокислотных фрагментов в препаратах ГК разреза 12-Ж (1), ГК разреза 13-Ж (4), ФК разреза 12-Ж (2), ФК разреза 13-Ж (5), торфа разреза 12-Ж (3), торфа разреза 13-Ж (6).

перераспределению гидролизующего азота в составе ГВ и его перевода в гидрофобную составляющую молекул ГВ. Уменьшение массовой доли азота от общего для ГВ также связано с образованием гетероциклических азотистых оснований, недоступных для питания микроорганизмов и растений, образующих каркас молекул гуминовых и фульвокислот. Высокая доля аминокислотных фрагментов ГВ нижних слоёв торфа, по-видимому, вызвана совокупным действием двух основных факторов: особенностями торфонакопления и гумификации органического вещества в условиях многолетней мерзлоты. Нижние слои торфа по ботаническому составу представлены преимущественно травянистой и древесной

растительностью в процессе образования мерзлоты (порядка 2000 лет назад), были законсервированы слоем многолетней мерзлоты и изолированы от дальнейших процессов трансформации органического вещества.

Содержание отдельных аминокислотных фрагментов в составе ГК и ФК тундровых почв колеблется, но общие закономерности их накопления укладываются в единую картину аминокислотного спектра (рис. 4). Согласно работам ряда исследователей и собственным данным, такая однотипность аминокислотного состава характерна не только для гумусовых веществ, но и для почв, высших, низших растений и микроорганизмов [21, 22]. Аминокислотный состав доминирующей растительности

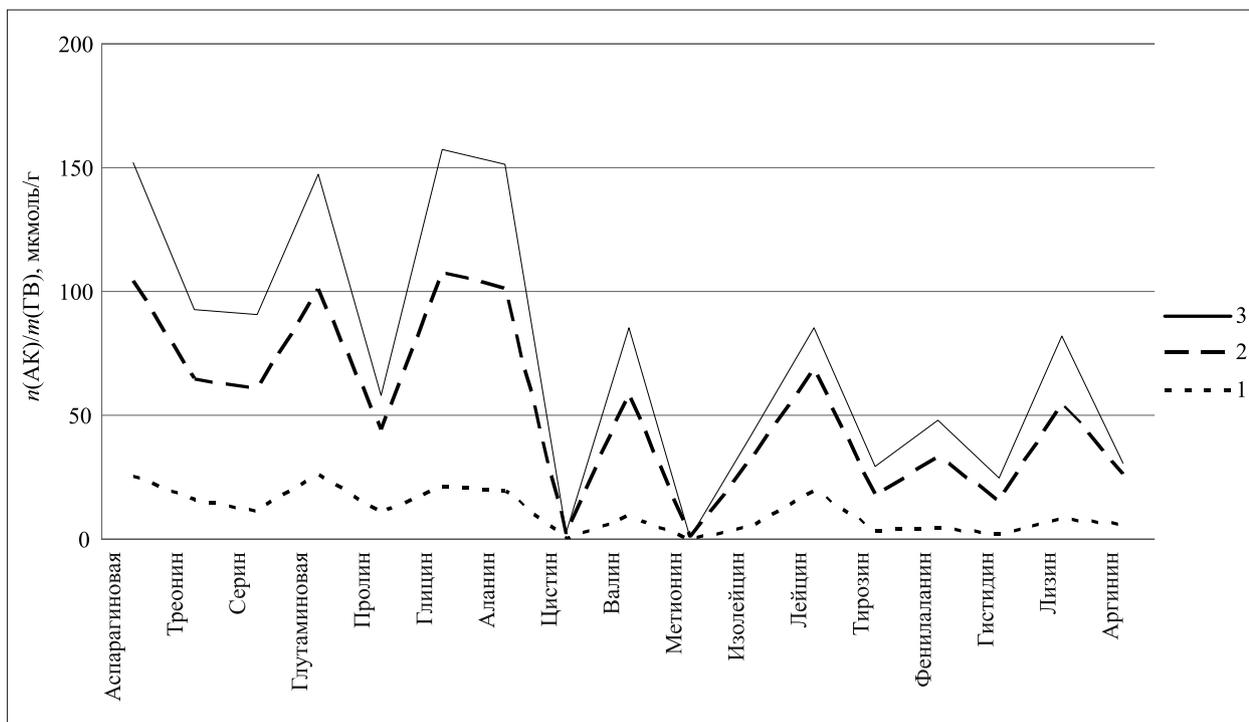


Рис. 4. Аминокислотный состав мха (*Polytrichum commune*) (1), ФК (2) и ГК (3) горизонта Т1 (0-10 см) сухоторфяной мерзлотной почвы бугров.

напочвенного покрова мха *Polytrichum commune* определяет качественный и количественный состав АК гумусовых веществ. Отмечается близкое соотношение аминокислот в составе моховой растительности и АК фрагментов в составе гуминовых и фульвокислот, что свидетельствует о доминирующем влиянии растительности на состав гумуса исследованных почв.

В составе гидролизуемой фракции гуминовых кислот преобладают нейтральные аминокислоты (глицин, аланин, треонин и др.), относительная мольная доля которых составляет 66,5–70,5% (рис. 5). Считается, что нейтральные аминокислоты являются наиболее устойчивыми. Доля кислых АК в ГК почв оголённых мерзлотных пятен составляет 19,3–25,6%, основных – 5,7–11,4%, ароматических – 4,2–7,0% и в ГК сухоторфяной мерзлотной почвы бугров доля кислых аминокислот составляет 22,1–22,4%, основных – 10,1–11,4%, ароматических – 5,7–6,4%. ФК характеризуются большим содержанием кислых (24,5–34,4%) и меньшим – основных АК (5,4–10,7%), что хорошо согласуется с их более кислой природой. Анализ полученных данных показывает близкий количественный состав нейтральных АК гуминовых и фульвокислот, что, возможно, связано с криогенной трансформацией ГК до структур ФК.

Экологический потенциал (ЭП) является количественным параметром экологических функций органического вещества. Степень ароматичности определяет биотермодинамическую устойчивость ГК, парамагнитная активность и количество ионогенных групп гуминовых кислот – общий уровень биохимической активности. Наличие ионогенных групп определяет экологические функции органического вещества почв путём иммобилизации и инактивации минеральных поллютантов. Экологический потенциал (ЭП) рассчитывается по следующей формуле:

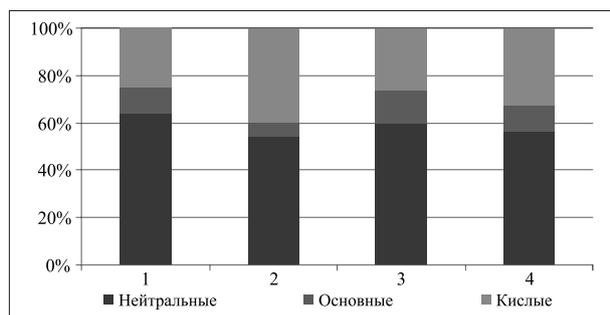


Рис. 5. Массовая доля групп АК в составе ГК (1) и ФК (2) почв оголённых мерзлотных пятен и ГК (3) и ФК (4) сухоторфяной мерзлотной почвы бугров.

$$\text{ЭПГВ} \approx fa \cdot K_{\text{КСР}} \cdot \Sigma IG \quad [23],$$

где fa – показатель ароматичности:

$$fa = AR / (AR + AL);$$

$K_{\text{КСР}}$ – коэффициент пропорциональности, обусловленный взаимодействием свободных радикалов с катионами металлов;

ΣIG – сумма ионогенных групп по данным ^{13}C -ЯМР.

Верхний слой торфа является биохимическим барьером, обладающим способностью сорбировать органические и органоминеральные соединения. На основании данных литературы [24] и собственных результатов, с применением однотипной методики расчёта, проведено сопоставление экологических потенциалов гуминовых кислот почв тундровой и таёжной зон с ЭП тундровых бугристых торфяников (табл.). Показано уменьшение экологического потенциала при переходе от почв таёжной к почвам тундровой зоны. Наименьшие значения ЭП соответствуют ГК сухоторфяной мерзлотной почвы бугров. Это свидетельствует о меньшей биотермодинамической устойчивости к деградации и минерализации под воздействием биологических и абиотических факторов гумусовых веществ криогенных торфяников. На основании этого очевиден вывод о высокой чувствительности органического вещества плоскобугристых торфяников тундровой зоны европейского северо-востока России к изменению климатических условий, усилению экологического пресса на природные экосистемы Арктики.

В тундровых плоскобугристых торфяниках идентифицирован гомологический ряд насыщенных органических кислот – С6 – С29, в составе органического вещества почв преобладают структуры с «чётным» числом атомов углерода С16, С18, С20, С22, С24, С26, С28

Таблица

Экологический потенциал гуминовых кислот для различных почв Республики Коми

Тип почвы	Горизонт	Экологический потенциал
Типичная подзолистая [24]	A0	16,1
Торфянисто-тундровая глеевая	O	11,4
Тундровая поверхностно-глеевая	A0	9,2
Торфяно-тундровая глеевая	O	6,9
Сухоторфяная мерзлотная почва бугров	T1	5,9

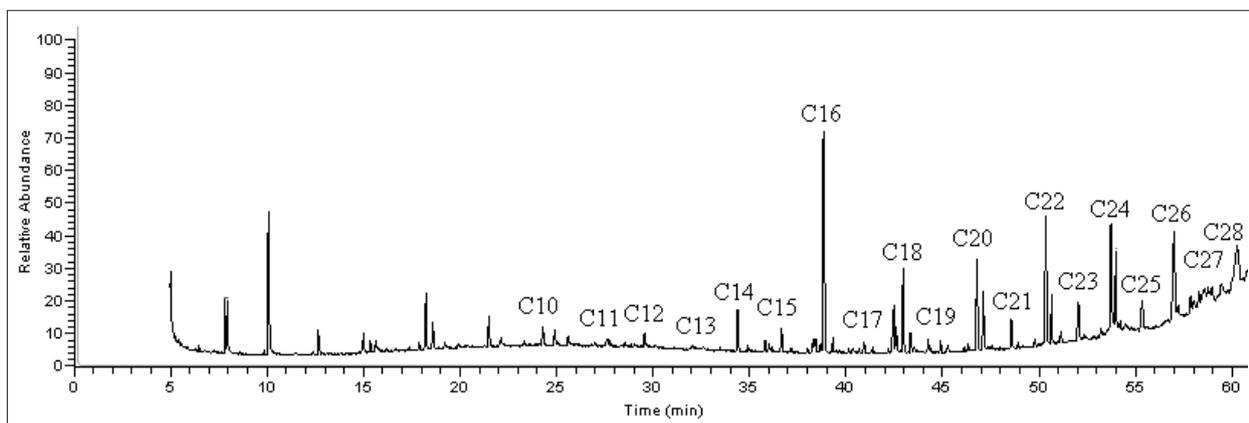


Рис. 6. Хроматограмма предельных органических кислот экстракта тундровой торфяной почвы.

(рис. 6). Суммарное содержание карбоновых кислот в горизонтах торфяников составляет 1,3–20,0 мг/г. Накопление «чётных» карбоновых кислот в органогенных горизонтах почв происходит в основном в результате трансформации органического вещества и их содержание значительно выше, чем в «нечётных».

Суммарное фоновое содержание органических кислот в бугристых торфяниках под растительными сообществами преобладает над торфяниками «оголённых» пятен. В мёрзлых слоях торфяников (80–150 см) массовая доля карбоновых кислот выше по сравнению с сезонно-оттаивающими горизонтами. Это связано с образованием их в периоды голоценового оптимума в торфяниках с последующей мерзлотной консервацией (рис. 7).

Проведён анализ накопления и детальное исследование профильного распределения водорастворимых фенолов в тундровых торфяниках (рис. 8).

Общее содержание водорастворимых фенолов в плоскобугристых торфяниках варьирует от 1,9 до 32 мкг/г, в «оголённых» мерзлотных пятнах – от 1,3 до 36 мкг/г.

В сезонно-оттаивающих горизонтах 0–60 см фенолы, как естественного, так и возможно техногенного происхождения, более подвержены химической и биохимической трансформации, что обуславливает их пониженные концентрации. В мерзлотных горизонтах 60–150 см, сформированных в период атлантического климатического оптимума в голоцене, содержание фенолов повышается

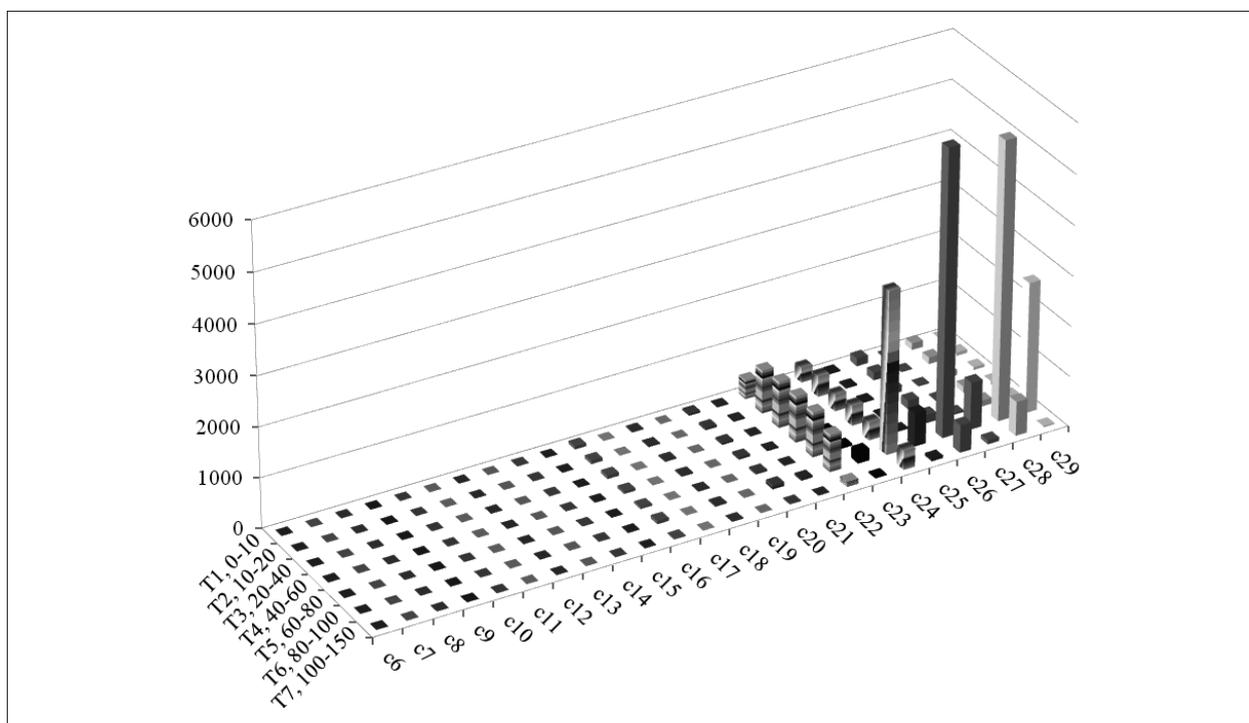


Рис. 7. Распределение карбоновых кислот в тундровых бугристых торфяниках, мкг/г.

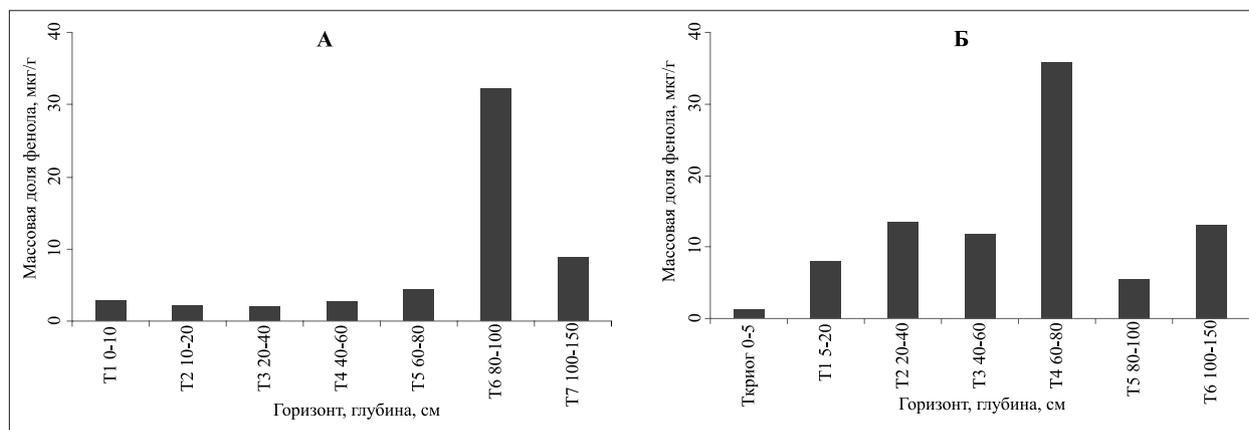


Рис. 8. Распределение фенола в тундровых бугристых торфяниках (сухоторфяная мерзлотная почва бугров – А, и почва оголённых мерзлотных пятен – Б).

в 2–8 раз. Следует отметить, что профильное распределение фенолов коррелирует с содержанием близких по структуре ароматических соединений – полициклических ароматических углеводородов, которые также являются продуктом деструкции и исходным веществом в процессах гумификации [25]. Это указывает на преимущественно природное происхождение фенола, образовавшегося в прошлых периодах при разложении остатков преобладающей в то время моховой и древесной растительности законсервированной в слое многолетней мерзлоты.

Таким образом, показано изменение элементного и аминокислотного состава по профилю торфяной толщи, что связано как с особенностями ботанического состава торфа, так и с криогенными процессами, протекающими на границе многолетней мерзлоты. Гумусовые вещества представлены слабоконденсированными структурами с низкими значениями экологического потенциала. Специфические и неспецифические органические соединения бугристых торфяников в мерзлотных горизонтах находятся в законсервированном состоянии и не подвержены трансформации по сравнению с сезоннооттаивающим слоем. В случае изменения климата будет меняться верхняя граница многолетней мерзлоты, что приведёт к модификации количественных и качественных параметров органических соединений и включению новых слоёв торфа в глобальный цикл углерода. Характерные спектры распределения карбоновых кислот, изучение различных их соотношений в сезоннооттаивающих слоях и многолетней мерзлоте торфяников возможно использовать в качестве маркеров (диагностических критериев) глобального изменения климата высоких широт.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-04-31303 и проекта молодых учёных и аспирантов УрО РАН № 14-4-НП-51.

Литература

1. Tarnocai C., Canadell J., Schuur E., Kuhry P., Mazhitova G., Zimov S., Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // *Global Biogeochemical Cycles*. 2009. V. 23. GB2023. P. 1–11.
2. Zimov S.A., Schuur E.A.G., Chapin F.S. Permafrost and the global carbon budget // *Science*. 2006. V. 312. P. 1612–1613.
3. Schouten S., Woltering M., Rijpstra W.I.C., Sluijs A., Brinkhuis H., Sinninghe Damst J.S. The Paleocene–Eocene carbon isotope excursion in higher plant organic matter: differential fractionation of angiosperms and conifers in the Arctic // *Earth and Planetary Science Letters*. 2007. V. 258. P. 581–592.
4. Zech M., Andreev A., Zech R., Mller S., Hambach U., Frechen M., Zech W. Quaternary vegetation changes derived from a loess-like permafrost palaeosol sequence in northeast Siberia using alkane biomarker and pollen analyses // *Boreas*. 2010. V. 39. P. 540–550.
5. Yunker M.B., Macdonald R.W., Snowdon L.R., Fowler B.R. Alkane and PAH biomarkers as tracers of terrigenous organic carbon in Arctic Ocean sediments // *Organic Geochemistry*. 2011. V. 42. P. 1109–1146.
6. Гостищева М.В., Инишева Л.И., Щеголихина А.И. Характеристика органического вещества торфяных почв эвтрофного болота Таган Томской области // *Вестник ТПУ*. 2010. № 3. С. 114–119.
7. Сартаков М.П., Тихова В.Д. Графостатистический анализ и спектроскопия ¹³C-ЯМР молекул гуминовых кислот торфов Среднего Приобья // *Вестник КрасГАУ*. 2009. № 6. С. 76–80.
8. Блажей А., Шутый Л. Фенольные соединения растительного происхождения. М.: Мир, 1977. 239 с.
9. Елин Е. С. Фенольные соединения в биосфере. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 392 с.

10. Geisler C., Swanson A.R., Zieve L., Anders M.W. Phthalate Interference in Gas-Chromatographic Determination of Long-Chain Fatty Acids in Plasma // *Clin. Chem.* 1979. V. 25. P. 308–310.
11. Евграфова С. Ю., Шантручкова Х., Шибистова О. Б., Элхоттова Д., Черна Б., Зражевская Г. К., Ллойд Д. Композиция жирных кислот мембран клеточных стенок микроорганизмов в почвах сосновых лесов средней Сибири // *Известия Российской академии наук. Серия биологическая.* 2008. № 5. С. 528–534.
12. Спозито Г. Термодинамика почвенных растворов. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 240 с.
13. Карта четвертичных отложений. Серия Северо-Уральская. Q–41–V. Масштаб 1:200000 / В.С. Енокиян. М.: Мин-во геологии и охраны недр СССР, 1959.
14. Атлас Республики Коми по климату и гидрологии / Под ред. А.И. Таскаева. М.: ДиК, Дрофа, 1997. 116 с.
15. Атлас почв Республики Коми / Г.В. Добровольский, А.И. Таскаев, И.В. Забоева. Сыктывкар: ООО «Коми республиканская типография», 2010. 356 с.
16. Swift R.S. *Methods of Soil Analysis* // *Soil Sci. Soc. Amer.* 1996. V. 3. P. 1018–1020.
17. Лодыгин Е.Д., Безносиков В.А., Василевич Р.С. Молекулярный состав гумусовых веществ тундровых почв (¹³C-ЯМР-спектроскопия) // *Почвоведение.* 2014. № 5. С. 546–552.
18. Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Моск. гос. ун-т, 1990. 325 с.
19. Зырин Н.Г., Овчинникова М.Ф., Орлов Д.С. Аминокислотный состав гуминовых кислот и фульвокислот некоторых типов почв // *Агробиохимия.* 1964. № 4. С. 108–120.
20. Василевич Р.С. Аминокислотный состав гумусовых веществ почв Большеземельской тундры // *Молодежь и наука на севере: Матер. докл. II Всерос. молодеж. науч. конфер. Сыктывкар.* 2013. Т. 1. С. 17–19.
21. Дюнос А.И., Кордуняну П.Н. Содержание и динамика аминокислот во фракциях органических соединений азота в обыкновенном черноземе // *Почвоведение.* 1978. № 9. С. 46–53.
22. Алиева М.И., Бездудная О.А., Володина С.О., Филиппова В.Н., Потапов Г.П., Володин В.В. Сравнительный аминокислотный состав растений – продуцентов экидистероидов // *Химия растительного сырья.* 2002. № 1. С. 63–68.
23. Лодыгин Е.Д., Безносиков В.А., Чуков С.Н. Структурно-функциональные параметры гумусовых веществ подзолистых и болотно-подзолистых почв. СПб: Наука, 2007. 145 с.
24. Лодыгин Е.Д., Безносиков В.А. Изучение молекулярной структуры гумусовых кислот подзолистых и болотно-подзолистых почв методом ¹³C-ЯМР спектроскопии // *Почвоведение.* 2003. № 9. С. 1085–1094.
25. Габов Д.Н., Безносиков В.А., Груздев И.В., Яковлева Е.В. Дифференциация неспецифических органических соединений в тундровых бугристых торфяниках // *Гуминовые вещества в биосфере: Матер. VI Всерос. науч. конфер. с междунар. участием. Сыктывкар.* 2014. С. 13–15.