

УДК 631.417

## ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИЕ АРОМАТИЧЕСКИЕ УГЛЕВОДОРОДЫ И ИЗОТОПЫ УГЛЕРОДА В ТОРФЕ МИГРАЦИОННОГО БУГРА ПУЧЕНИЯ (БОЛЬШЕЗЕМЕЛЬСКАЯ ТУНДРА)<sup>1</sup>

© 2021 г. Ю. К. Васильчук<sup>а, \*</sup>, А. Д. Белик<sup>а</sup>, Н. А. Буданцева<sup>а</sup>, А. Н. Геннадиев<sup>а</sup>, А. К. Васильчук<sup>а</sup>,  
Дж. Ю. Васильчук<sup>а</sup>, Ю. А. Завгородняя<sup>а</sup>, А. П. Гинзбург<sup>а</sup>, Л. Б. Блудушкина<sup>а</sup>

<sup>а</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

\*e-mail: vasilch\_geo@mail.ru

Поступила в редакцию 07.11.2020 г.

После доработки 23.12.2020 г.

Принята к публикации 28.12.2020 г.

Проанализировано содержание полициклических ароматических углеводородов и изотопный состав углерода в торфе бугра пучения, расположенного в районе пос. Елецкий (городской округ Воркута, Республика Коми). Величины  $\delta^{13}\text{C}$  варьируют от  $-28.05$  до  $-30.05\text{‰}$  (среднее значение  $-29.15\text{‰}$ ). Суммарное содержание ПАУ изменяется от 11 до 360 нг/г, при среднем значении 63 нг/г и медианном 34 нг/г. Среди ПАУ преобладают тяжелые соединения – бенз(а)антрацен, бензфлуорантены. Наличие ПАУ в торфяном материале обусловлено тремя основными факторами: техногенным воздействием, природными пожарами, биогеохимическими почвенными процессами. В верхней части торфяного бугра, до глубины сезонно-талого слоя преобладание бенз(а)антрацена маркирует антропогенное воздействие (влияние транспорта и коммунально-бытового хозяйства). Ниже доля бенз(а)антрацена уменьшается, увеличивается доля бензфлуорантов. При этом наблюдается два резких максимума ПАУ (260 и 360 нг/г), совпадающих с локальным утяжелением изотопного состава и, вероятно, являющихся результатом природных пожаров. Минимумы ПАУ скорее всего обусловлены биогеохимическим фактором и поступлением полиаренов при разложении растительных остатков. Изотопный состав углерода торфа отражает изотопный состав растительности, степень увлажненности торфяника, а также влияние пирогенного фактора.

*Ключевые слова:* полиарены, палеосреда, природные пожары, стабильные изотопы углерода, Dystric Histosols

DOI: 10.31857/S0032180X21070133

### ВВЕДЕНИЕ

Многолетнемерзлые бугры пучения на торфянике обычно называют лапландским словом “пальза”, обозначающим торфяной или торфяно-минеральный выпуклый бугор, сложенный торфом или минеральными отложениями, обычно тонкодисперсными, перекрытыми торфом, с льдистым ядром. Эти бугры также называют миграционными буграми, потому что их льдистое ядро, сложенное шширами и линзами сегрегационного льда, формируется в процессе миграции влаги из окружающего болота или из фильтрующихся сверху атмосферных осадков к фронту промерзания, то есть к формирующемуся ядру. Торф миграционных бугров пучения (пальза) может рассматриваться как архив свидетельств природных условий времени их формирования и имевших

место техногенных воздействий. Конкретными индикаторами этих условий могут быть изотопный состав углерода торфа, а также ПАУ и другие биомаркеры в торфяной толще [26, 30].

Природными источниками ПАУ в торфе бугров пучения могут быть процессы горения биомассы [27] и растительные остатки, трансформирующиеся почвенными процессами. В работе [36] авторы идентифицировали природные палеопожары по наличию в погребенных почвах тяжелых ПАУ – пирена, флуорантена, бензфлуорантенов и некоторых других. Воздействие пирогенного фактора часто оценивается по диагностическим соотношениям ПАУ, описанным, например, в работе [17], основанным на различных энергозатратах при образовании индивидуальных соединений.

Возможно также природное биогеохимическое происхождение ПАУ. Хотя в настоящий момент это явление не до конца изучено, в ландшафтах, не затронутых антропогенной деятельностью, полиа-

<sup>1</sup> К статье имеются дополнительные материалы, доступные для авторизованных пользователей по doi: 10.31857/S0032180X21070133.

рены широко распространены и описаны [8, 9, 12, 13, 16]. По данным [11] в природных условиях в составе ПАУ торфяных образований преобладают легкие полиарены, а именно трициклические фенантрен и его алкилпроизводные. Геннадиевым с соавт. предложен показатель естественного био-трансформационного потенциала почв по отношению к ПАУ, который выражается в соотношении фенантрена и его производных [11].

Изотопный состав углерода органического вещества торфа во многом наследуется от растительности [14, 29], он зависит от температуры в вегетационный период, от обводненности болот и особенностей процессов разложения органических остатков. Изотопный сигнал растений-торфообразователей варьирует в основном от  $-20\%$  в олиготрофных мхах до  $-29\%$  в осоках [21]. Листья осоковых сильнее обогащены  $^{13}\text{C}$ , чем листья кустарниковых, а образцы сфагнума характеризуются диапазоном значений  $\delta^{13}\text{C}$  от  $-25.0$  и  $-29.6\%$  [35]. В работе [21] установлено, что торф в условиях аэробного разложения органического вещества, обычно характеризуется существенным уменьшением значений  $\delta^{13}\text{C}$  с глубиной (из-за большего обеднения более старых глубинных слоев изотопом  $^{12}\text{C}$  в результате эмиссии), а в условиях анаэробной деструкции почвы обычно показывают незначительное увеличение с глубиной значений  $\delta^{13}\text{C}$  или полное его отсутствие из-за замедления микробиологических процессов на глубине. Таким образом, распределение  $^{12}\text{C}$  и  $^{13}\text{C}$  в профиле торфяной почвы отражает суммарный эффект процессов фракционирования в ходе фотосинтеза и микробиологического разложения. Равномерные или слабо растущие значения  $\delta^{13}\text{C}$  с глубиной считаются признаком молодых почв [19, 22–24, 28].

Целью данной работы является выявление особенностей распределения изотопов  $^{13}\text{C}$  и полициклических ароматических углеводородов в торфе миграционного бугра пучения для установления генезиса этих явлений. Были поставлены следующие задачи: 1) проанализировать особенности содержания ПАУ и изотопов углерода в профиле пальза; 2) установить источники поступления в торф миграционного бугра пучения ПАУ и выявить динамику изотопного состава углерода.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

**Местоположение и природные условия участка исследований.** В северо-восточной части Большеземельской тундры в пределах бугристого массива в районе пос. Елецкий (рис. S1) на расстоянии 1.5 км на восток от населенного пункта и 500 м от железной дороги был детально исследован миграционный бугор пучения (пальза) высотой 3.5 м и диаметром 10 м со склонами крутизной до 15 градусов (рис. S2). Бугор покрыт мохово-травяни-

стой растительностью с примесью кустарничков (сфагнум, кукушкин лен, осоки, береза карликовая). Возраст пальза, согласно данным радиоуглеродного датирования, составляет более 6400 лет [3, 4].

Большая часть территории характеризуется бугристым рельефом с невысокими плосковершинными холмами, грядами и разделяющими их неглубокими котловинными понижениями с пологими склонами, широкими днищами, которые, как правило, заняты озерами, болотами и торфяниками, в пределах которых распространены пальза.

Климат территории субарктический, умеренно-континентальный, лето короткое и холодное, зима многоснежная, продолжительная и суровая. Климат формируется в условиях малого количества солнечной радиации зимой, под воздействием северных морей и интенсивного западного переноса воздушных масс. Вынос теплого морского воздуха, связанный с прохождением атлантических циклонов, и частые вторжения арктического воздуха с Северного Ледовитого океана придают погоде большую неустойчивость в течение всего года [10].

Годовая амплитуда температур составляет  $32.7^\circ\text{C}$ . Самым теплым месяцем года является июль (средняя месячная температура  $+12.4^\circ\text{C}$ ), самым холодным – январь ( $-20.3^\circ\text{C}$ ). Среднегодовая температура воздуха равна  $-6.0^\circ\text{C}$ . Число дней со средней суточной температурой воздуха выше нуля градусов составляет 125.

Высота снежного покрова увеличивается от ноября к январю, в месяцы с наибольшей повторяемостью циклонической погоды. Наибольшей величины запас снежного покрова достигает во второй декаде марта. Наибольшая за зиму средняя высота снежного покрова составляет 75 см [10].

Типы ландшафтов на территории – южно-тундровые полого-увалистые равнины с покровом пылеватых суглинков, подстилаемых моренной и южно-тундровые и лесотундровые возвышенности, и волнисто-увалистые предгорья Приполярного Урала [10].

Растительность на территории исследования – тундровая, мохово-травянисто-кустарничковая. Представлены такие виды, как сфагнум (*Sphagnum*), кукушкин лен (*Polytrichum commune*), черника (*Vaccinium myrtillus*), голубика (*Vaccinium uliginosum*), морошка (*Rubus chamaemorus*), береза карликовая (*Betula nana*), а также различные виды осок (*Carex*).

Среди почв преобладают криоземы, криометаморфические, торфоземы. Исследуемая территория располагается в пределах Печорской низменности в подзоне южной тундры, в Большеземельской провинции, в Воркутинском округе тундровых поверхностно-глеевых, торфянисто- и торфяно-глеевых тундровых мерзлотных почв [1, 6]. На плоских увалах широко распростране-

ны процессы застойного переувлажнения поверхностными водами с образованием на обширных пространствах торфяно-болотных почв. При улучшении дренажа поверхности возникают мелкоконтурные сочетания и мозаичные комплексы полугидроморфных и автоморфных почв [1, 6].

**Полевые методы.** Исследования проводили в конце сентября 2019 и 2020 гг., когда сезонное протаивание достигает максимальных отметок от 80 до 100 см. На вершине бугра пучения был заложён разрез глубиной 100 см. Изученная почва относится к торфяным олиготрофным (Dystric Histosol). Из растаявшего торфа с интервалом 1–3 см был произведен отбор образцов для анализа содержания изотопов углерода и ПАУ. Ниже при бурении были взяты 5 образцов мерзлого торфа до глубины 140 см. Отбор мерзлого керна производили с помощью электроледобура Bosch.

**Определения изотопов углерода.** Аналитические исследования проводили в течение 1–6 месяцев после отбора образцов. Торф просушивался при температуре около 25–30°C, измельчался, просеивался через сито 0.25 мм. Изотопный состав определялся для валового углерода торфа [5, 33, 34].

Определения изотопного состава углерода проводились в изотопной лаборатории географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова на масс-спектрометре Delta-V Plus со стандартной опцией элемент-анализатор EA 1112 HT O/N-N/C. Для измерений использованы международные стандарты IAEA-CH-3, IAEA-CH-6, IAEA-600 и USGS-24. Точность измерений величин  $\delta^{13}\text{C}$  на приборе составила  $\pm 0.2\%$ .

**Исследование ПАУ.** Определения ПАУ выполнялись методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. Пробоподготовка включала в себя экстракцию дихлорметаном (20 мл дихлорметана на 1 г сухого торфа). Полученный экстракт был профильтрован, выпарен, реэкстрагирован гексаном и очищен на патронах с модифицированным силикагелем Диапак-С. Выпаривание проводилось на воздухе досуха. Очищенный экстракт также выпаривался, реэкстрагировался ацетонитрилом. Измерения выполнялись на приборе Agilent 1260 в химико-аналитическом центре факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова. Было определено 13 индивидуальных соединений: нафталин, флуорен, аценафтен, фенантрен, антрацен, пирен, хризен, флуорантен, бенз(а)пирен, бенз(а)антрацен, бенз(б)флуорантен, бенз(к)флуорантен, бенз(ghi)перилен.

**Обработка полученных данных.** Для ПАУ были рассчитаны индикаторные соотношения антрацен/фенантрен и флуорантен/флуорантен + пирен, описанные в работе [17]. Оба этих соотношения показывают степень пирогенности или петрогенности исследуемой ассоциации. Значения выше 1 и 0.5, соответственно, указывают на пре-

имущественно пирогенный характер ассоциации, ниже этих значений – на преимущественно петрогенный.

Был применен также кластерный анализ концентраций ПАУ с целью выявления сродства различных соединений друг другу. Анализ выполнялся в среде R в пакете “cluster” агломеративным методом.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Средняя величина концентрации ПАУ в торфе равна 63 нг/г, медианная – 34 нг/г. Большая часть величин содержания ПАУ лежит в пределах от 10 до 40 нг/г. У поверхности бугра содержание ПАУ повышено (42 нг/г), глубже оно несколько уменьшается (до 33 нг/г). На глубине 60–63 см и 84–87 см наблюдаются резкие максимумы содержания ПАУ – до 360 и 260 нг/г соответственно. В целом, в нижней части бугра среднее содержание ПАУ в торфе больше, чем в верхней (в верхней части 28, в нижней – 36 нг/г). Небольшое локальное увеличение концентрации наблюдается также на глубинах 114–117 и 141–144 см. Минимальные величины содержания ПАУ обнаружены на глубинах 6–9 и 129–132 см (табл. 1).

Преобладающим индивидуальным соединением является бенз(а)антрацен (среднее содержание 26 нг/г, медианное – 8 нг/г), менее выражено доминирование бенз(к)флуорантена и бенз(б)флуорантена (среднее содержание 8 нг/г для каждого из них, медианное – 2.6 нг/г для бенз(б)флуорантена и 3.4 нг/г для бенз(к)флуорантена). В содержании тяжелых соединений присутствует выраженный глубинный тренд: доля бенз(а)антрацена является доминирующей до глубины 60–63 см, глубже основную массу ПАУ составляют бензфлуорантены (рис. 1).

Изотопный состав углерода торфа варьирует слабо. Максимальная величина  $\delta^{13}\text{C}$  составляет  $-28.05\%$  и наблюдается на глубине 63–66 см, минимальная составляет  $-30.5\%$  и наблюдается на глубине 33–36 см (рис. 2). Среднее значение  $\delta^{13}\text{C}$  составило  $-29.15\%$ . Выраженной тенденции к облегчению либо утяжелению изотопного состава с глубиной не наблюдается. При этом облегчения изотопного состава имеют место на глубинах 36–39, 57–60 и 120–123 см. Его утяжеление происходит на глубинах 6–9, 63–66, 87–90, 102–105 см.

Выявлена незначительная положительная корреляционная связь нафталина с изотопным составом углерода торфа ( $r = 0.5$ ). Слабая отрицательная корреляционная связь наблюдается у изотопного состава углерода с бенз(а)пиреном. Корреляции суммы ПАУ с изотопным составом как таковой не наблюдается, однако в нижней части профиля локальные повышения содержания ПАУ соответствуют более тяжелому изотопному составу (рис. 2). Об-

**Таблица 1.** Сумма ПАУ и рассчитанные индикаторные отношения ПАУ в торфе

Номер образца	Глубина, см	Сумма ПАУ, нг/г	Индикаторные соотношения (по [17])	
			антрацен/фенантрен	флуорантен/ [флуорантен + пирен]
1	0–3	42.39	0.14	0.69
2	6–9	9.73	–	0.97
3	12–15	33.38	0.25	0.84
4	15–18	12.33	0.82	0.57
5	18–21	28.44	0.02	0.67
6	24–27	34.44	–	0.80
7	33–36	31.95	–	0.76
8	51–54	33.51	–	0.75
9	59–62	67.66	43.19	0.00
10	60–63	359.12	0.30	0.26
11	78–81	36.06	–	0.00
12	84–87	256.61	3.29	0.13
13	87–90	65.84	–	0.74
14	96–99	36.42	–	0.37
15	105–108	23.88	–	0.66
16	114–117	51.81	–	0.19
17	123–126	17.38	–	0.40
18	129–132	11.97	0.03	0.00
19	141–144	50.96	–	0.00

ратная ситуация характерна для верхней части профиля: менее отрицательные величины  $\delta^{13}\text{C}$  соответствуют меньшим концентрациям ПАУ.

В ходе кластерного анализа было выделено 3 кластера ПАУ по проявлению сродства друг к другу и по сходной изменчивости: первый кластер включает антрацен, хризен, пирен, бенз(ghi)перилен. Второй кластер включает бенз(a)пирен, фенантрен, нафталин, аценафтен, флуорен, флуорантен, третий – бенз(k)флуорантен и бенз(b)флуорантен. Бенз(a)антрацен не проявляет сродства ни к одному из исследуемых соединений. Похожее распределение по группам отмечалось в работе [25], однако особое положение бенз(a)антрацена и его доминирование в ассоциации ПАУ ранее не выявлялось.

Установленные особенности распределения, состава и концентрации ПАУ и изотопов углерода торфа являются результатом совокупного воздействия различных факторов – растительности, перераспределения вещества в процессах промерзания-протаивания, влияния климатических причин, антропогенного воздействия.

При сравнении полученных данных с литературными выявлено, что содержание ПАУ в исследуемом торфяном бугре относительно невелико.

Например, по данным работы [8] для торфяных бугров вблизи пос. Сейда были описаны величины содержания ПАУ от 160 до 8500 нг/г, в то время как в торфяных буграх вблизи пос. Елецкий наблюдаются величины от 10 до 360 нг/г. Такие величины, как в исследуемых торфяных буграх, более характерны для минеральных почв у пос. Сейда [7]. Кроме того, в указанной работе отмечается преобладание легких 2-4-ядерных ПАУ, в то время как в буграх вблизи пос. Елецкий абсолютно преобладают 5-ядерные соединения. В исследованном нами бугре пучения отмечено значительное увеличение содержания ПАУ ниже границы сезонно-талого слоя, что аналогично особенностям, отмеченным ранее для торфяных почв вблизи г. Инта [9].

Исследуемая территория находится вблизи таких объектов антропогенного воздействия, как железная дорога и поселок городского типа с печным отоплением. Эти факторы вносят вклад в содержание ПАУ в торфяных буграх пучения, главным образом, в верхних слоях торфа, в частности, приповерхностный максимум, по всей вероятности, объясняется этим влиянием, что подтверждается наличием в приповерхностной пробе максимума флуорантена, который в работе [8] от-

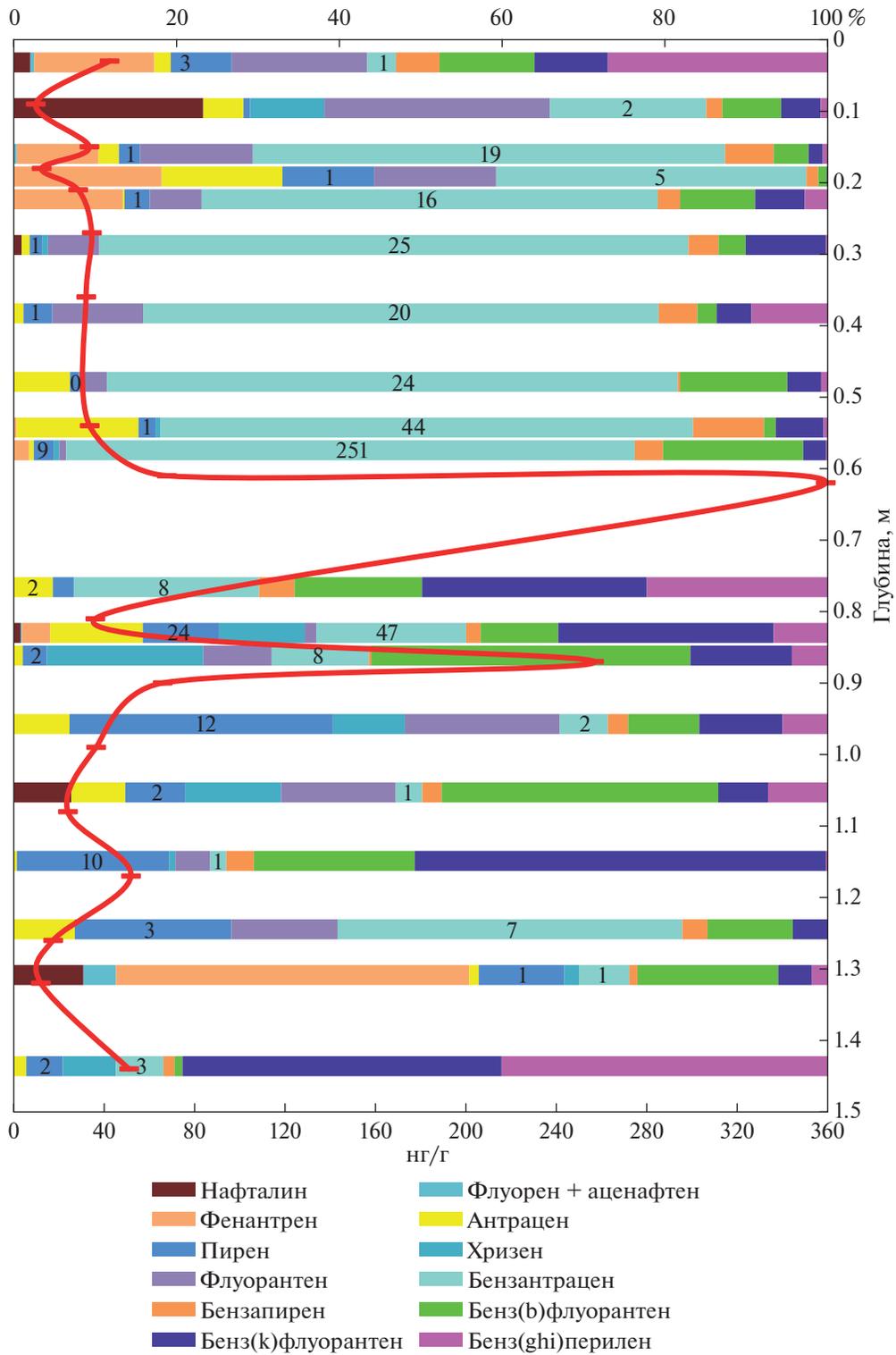


Рис. 1. Доля индивидуальных соединений в сумме ПАУ. Содержание индивидуальных ПАУ в образцах торфа в миграционном бугре пучения вблизи пос. Елецкий.

носится к “техногенным” ПАУ. Также к техногенным образованиям большинство исследователей относят бенз(а)антрацен, который в исследованном нами бугре пучения является преобладающим

ПАУ в слое торфа на глубине от 0 до 60 см, то есть до нижней границы сезонно-талого слоя. Его доминирующее содержание во всей этой толще связано, по-видимому, с процессами вертикального

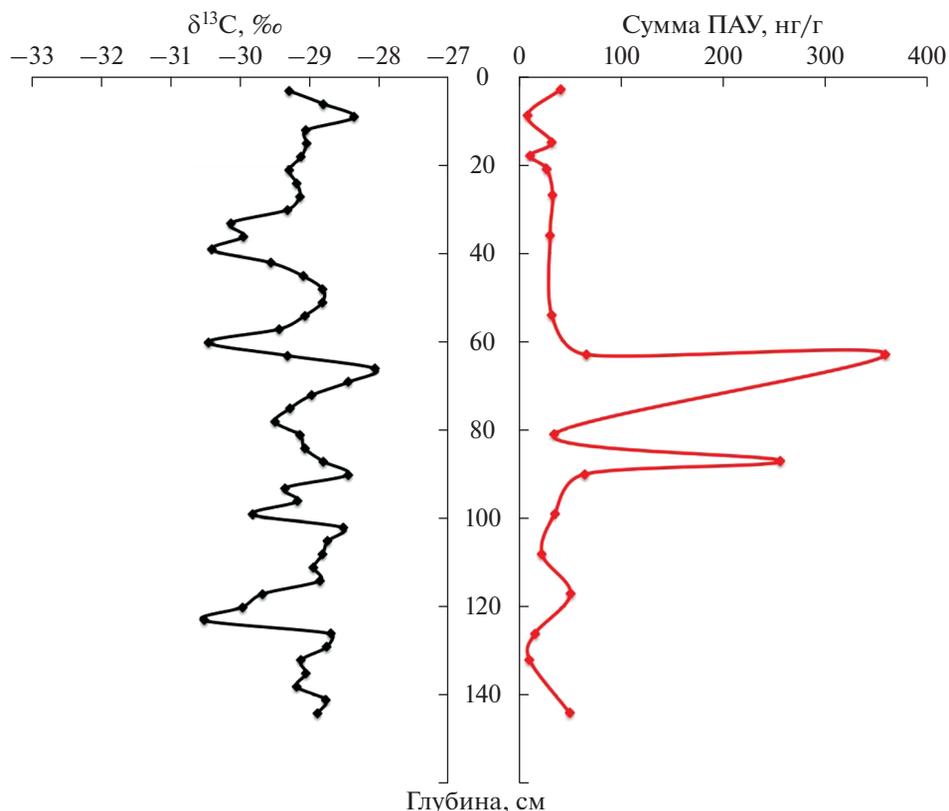


Рис. 2. Изотопный состав углерода и суммарная концентрация ПАУ в торфяной толще.

перемещения вещества, обусловленного, главным образом, процессами промерзания-протаивания. Индикаторные соотношения на этих глубинах не позволяют однозначно отнести ассоциацию ПАУ в исследуемом торфяном материале к пирогенной, что свидетельствует о смешанном влиянии факторов в данном случае. Более глубоко залегающая часть торфяного материала скорее всего не затронута антропогенным влиянием, и ПАУ в ней имеют природное происхождение.

Это относится и к резким максимумам концентрации ПАУ (260 и 360 нг/г), находящимся на глубинах 60–63 и 84–87 см, которые могут быть следствием природных палеопожаров, тем более, что на этих глубинах увеличивается концентрация пирена, бенз(б)флуорантена, бенз(к)флуорантена, продуцирование которых, согласно работе [36], является характерным признаком горения биомассы.

Индикаторные соотношения антрацен/фенантрен, флуорантен/флуорантен + пирен, рассчитанные по [17], в большинстве образцов из всей опробованной толщи торфа характеризуются величинами меньше 1 и меньше 0.5, что указывает на петрогенное, низкотемпературное происхождение ПАУ. В то же время на глубинах 60–63 и 84–87 см соотношение антрацен/фенантрен составляет 43 и 3 соответственно, что подтверждает

предположение о пирогенной природе ПАУ на этих глубинах.

Более низкие концентрации ПАУ в торфе на глубине более 60 см по всей вероятности имеют биогеохимическую природу и обусловлены в значительной степени трансформацией растительных остатков в результате протекания почвенных процессов. Как было отмечено выше, возможность поступления ПАУ из растительных источников, в том числе тяжелых соединений, таких как бенз(ghi)перилен, бенз(а)пирен, допускается в ряде работ [12, 15, 18]. При этом индикаторные соотношения флуорантен/флуорантен + пирен на некоторых уровнях в мерзлой толще торфяника (на глубине более 60 см) указывают на возможное воздействие природных пожаров.

Вариации состава ПАУ в торфе бугра пучения на большей глубине могут быть также связаны с изменчивостью состава растительных остатков во второй половине голоцена (как было указано выше, радиоуглеродный возраст торфяного вещества исследованного бугра пучения на глубине 0.5 м составляет  $6400 \pm 60$  лет [3]).

В меньшей степени, чем ПАУ, изменчивы по профилю торфяной толщи исследованного бугра пучения значения  $\delta^{13}\text{C}$ . В целом они характеризуются относительно низкими величинами

( $\delta^{13}\text{C} -28\text{...}-30\text{‰}$ ) по сравнению, например, с изотопным составом углерода торфяных болот центральной Европы, где они характеризуются значениями  $\delta^{13}\text{C}$ , равными  $-26\text{...}-28\text{‰}$  [20]. Вероятно, эта разница объясняется климатическими особенностями: в холодном климате трансформация органического вещества торфяника протекает гораздо менее интенсивно, в результате чего не происходит утяжеления изотопного состава со временем. Отсутствие явного глубинного тренда в изменении изотопного состава углерода согласно [2, 31, 32] указывает на то, что в настоящее время рассматриваемый бугор пучения не подвергается деградации и остается в стабильном состоянии. Кроме того, могут иметь место различия в факторе растительности, поскольку вслед за климатическими особенностями, изменяется видовой состав растительности и эффективность фотосинтеза.

В изотопном составе торфа изученного бугра пучения имеют место заметные вариации изменения величин  $\delta^{13}\text{C}$ . Некоторое утяжеление изотопного состава, по-видимому, свидетельствует об эпизодах меньшего увлажнения и аэробных условий. Наоборот, эпизоды уменьшения величин  $\delta^{13}\text{C}$  могут свидетельствовать об усилении гидроморфности, преобладании анаэробных условий и анаэробной деградации органического вещества [4].

Величины и изменчивость изотопного состава торфа регулируются, по-видимому, изменчивостью растительности, его слагающей. Изотопный состав углерода растений-торфообразователей может значительно отличаться. Так, для осок он характеризуется величиной  $\delta^{13}\text{C} = -29\text{‰}$ , а для мхов  $-22\text{...}-20\text{‰}$  [20]. Остатки древесной и кустарничковой растительности, законсервированные в торфе, имеют значения  $\delta^{13}\text{C} -25.5\text{‰}$  [4]. Исходя из этого, можно предположить, что торфяные бугры пучения со значениями  $\delta^{13}\text{C}$  в диапазоне  $-28\text{...}-30\text{‰}$  формировались, главным образом, при участии травянистой растительности.

Сопоставление особенностей вертикального распределения в торфянике концентраций ПАУ и величин  $\delta^{13}\text{C}$  позволяет более однозначно идентифицировать роль палеопожаров в формировании торфяной толщи миграционного бугра пучения. Эпизоды палеопожаров, предположительно, должны вызывать утяжеление изотопного состава углерода исходного горимого вещества и повышение концентрации тяжелых ПАУ, в особенности пирена, бензфлуорантенов, бенз(а)антрацена. На глубине 60–66 см в исследуемом торфяном бугре присутствует резкий скачок содержания ПАУ и резкое утяжеление изотопного состава, что подтверждает предположение о влиянии палеопожара на этой глубине. Следует признать, что других совпадений подобного рода не наблюдается.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ПАУ в торфе миграционного бугра пучения (пальза) у пос. Елецкий представлены в основном тяжелыми соединениями (бенз(а)антраценом, бенз(б)флуорантеном, бенз(к)флуорантеном). Максимумы ПАУ (360 и 260 нг/г), вероятно, обусловлены палеопожарами. Большое количество бенз(а)антрацена в сезонно-талом слое, вероятно, связано с антропогенным фактором, то есть поступлением поллютантов из атмосферы. При этом имеет место вертикальное перемещение вещества вследствие процессов промерзания–оттаивания, что способствует относительно равномерному его распределению до верхней границы многолетней мерзлой толщи.

Изотопный состав углерода торфа в бугре пучения определяется изотопным составом растительности, из которой формируется торф, условиями увлажнения и степенью деградации органического вещества.

Изотопный состав углерода торфа изученного миграционного бугра (пальза) относительно легкий (величина  $\delta^{13}\text{C}$  равна  $-28\text{...}-30\text{‰}$ ). Такие величины близки к изотопному составу травянистых растений и говорят, вероятно, о том, что торф формировался преимущественно из этого типа растительности. Имеют место заметные вариации изотопного состава. Эпизоды относительно резкого утяжеления, возможно, говорят о периодах худшего увлажнения и аэробных условий; наоборот, эпизоды облегчения могут свидетельствовать о преобладании анаэробных условий и анаэробной деструкции органического вещества.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при поддержке РНФ (№19-17-00126 – анализ стабильных изотопов) и РФФИ (18-05-60272 – обобщение данных).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Рис. S1. Район исследований на снимках Google Earth.

Рис. S2. Миграционные бугры пучения (пальза), исследованные в районе пос. Елецкий (фото Н.А. Буданцевой).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас почв республики Коми. Сыктывкар: Ин-т биологии УрО РАН, 2010. 346 с.
2. Буданцева Н.А., Чижова Ю.Н., Васильчук Ю.К. Отражение в изотопном составе торфа фаз развития

- бугристых ландшафтов Большеземельской тундры // Арктика и Антарктика. 2016. № 1. С. 18–31. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2016.1.21420>
3. Буданцева Н.А., Чижова Ю.Н., Блудушкина Л.Б., Васильчук Ю.К. Стабильные изотопы кислорода, водорода и углерода и возраст палза близ поселка Елецкий, северо-восток Большеземельской тундры // Арктика и Антарктика. 2017. № 4. С. 38–56. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2017.4.25087>
  4. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Волкова Е.М., Сулержицкий Л.Д., Чижова Ю.Н., Юнгнер Х. Радиоуглеродные датировки и голоценовая динамика бугров пучения в долине реки Уса // Доклады Российской академии наук. 2002. Т. 384. № 3. С. 395–401.
  5. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Чижова Ю.Н. Выпуклые бугры пучения многолетнемерзлых торфяных массивов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. 571 с.
  6. Васильчук Ю.К., Васильчук Дж.Ю., Белик А.Д., Гинзбург А.П., Буданцева Н.А., Васильчук А.К. Криогенные почвы близ пос. Елецкий, север-восток Республики Коми // Арктика и Антарктика. 2020. № 4. С. 51–79. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2020.4.34011>
  7. Габов Д.Н., Безносиков В.А., Кондратенко Б.М. Полициклические ароматические углеводороды в подзолистых и торфянисто-подзолисто-глеватых почвах фоновых ландшафтов // Почвоведение. 2007. № 3. С. 282–291.
  8. Габов Д.Н., Безносиков В.А., Яковлева Е.В. Накопление полициклических ароматических углеводородов в тундровых бугристых торфяниках в условиях изменения климата в высоких широтах // Геохимия. 2017. № 8. С. 741–756. <https://doi.org/10.7868/S0016752517060036>
  9. Габов Д.Н., Яковлева Е.В., Василевич Р.С., Кузнецов О.Л., Безносиков В.А. Полициклические ароматические углеводороды в мерзлотных бугристых торфяниках криолитозоны // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1049–1062. <https://doi.org/10.1134/S0032180X1909003X>
  10. Корректировка генерального плана муниципального образования городского округа “Воркута” Республики Коми. Т. 2. Материалы по обоснованию. Нижний Новгород, 2019. 107 с.
  11. Геннадиев А.Н., Козин И.С., Шурубор Е.И., Теплицкая Т.А. Динамика загрязнения почв полициклическими ароматическими углеводородами и индикация состояния почвенных экосистем // Почвоведение. 1990. № 10. С. 75.
  12. Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И., Флоровская В.Н., Алексеева Т.А., Козин И.С., Оглоблина А.И., Раменская М.Е. и др. Геохимия полициклических ароматических углеводородов в горных породах и почвах. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1996. 190 с.
  13. Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И., Цибарт А.С., Смирнова М.А. Углеводороды в почвах: происхождение, состав, поведение (обзор) // Почвоведение. 2015. № 10. С. 1195–1195. <https://doi.org/10.1134/S1064229315100026>
  14. Макаров М.И., Малышева Т.И., Гончаров А.А., Тиунов А.В. Изотопный состав углерода гумусовых кислот дерново-подзолистых почв и черноземов // Почвоведение. 2020. № 4. С. 414–420. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20040097>
  15. Пастухов А.В., Каверин Д.А., Габов Д.Н. Полициклические ароматические углеводороды в мерзлотных бугристых торфяниках на европейском северо-востоке // Почвоведение. 2017. № 7. С. 814–823. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17070097>
  16. Пиковский Ю.И., Смирнова М.А., Геннадиев А.Н., Завгородняя Ю.А., Жидкин А.П., Ковач Р.Г., Кошовский Т.С. Параметры нативного углеводородного состояния почв различных биоклиматических зон // Почвоведение. 2019. № 11. С. 1307–1321. <https://doi.org/10.1134/S0032180X1911008X>
  17. Хаустов А.П., Редина М.М. Геохимические маркеры на основе соотношений концентраций ПАУ в нефти и нефтезагрязненных объектах // Геохимия. 2017. № 1. С. 57–67. <https://doi.org/10.7868/S0016752516120049>
  18. Яковлева Е.В., Габов Д.Н., Паноков А.Н. Аккумуляция полиаренов в растениях бугристых торфяников побережья Баренцева моря // Почвоведение. 2020. № 11. С. 1316–1327. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20110131>
  19. Ågren G.I., Bosatta E., Balesdent J. Isotope discrimination during decomposition of organic matter: a theoretical analysis // Soil Sci. Soc. Am. J. 1996. V. 60. № 4. P. 1121–1126. <https://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000040023x>
  20. Alewell C., Schaub M., Conen F. A method to detect soil carbon degradation during soil erosion // Biogeosciences. 2009. V. 6. P. 2541–2547. <https://doi.org/10.5194/bg-6-2541-2009>
  21. Alewell C., Giesler R., Klaminder J., Leifeld J., Rollog M. Stable carbon isotopes as indicators for micro-geomorphic changes in peatlands // Biogeosciences. 2011. V. 8. P. 1769–1778. <https://doi.org/10.5194/bgd-8-527-2011>
  22. van Bellen S., Garneau M., Ali A.A., Bergeron Y. Did fires drive Holocene carbon sequestration in boreal ombrotrophic peatlands of eastern Canada? // Quaternary Research. 2012. V. 78(1). P. 50–59. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2012.03.009>
  23. Benner R., Fogel M.L., Sprague E.K., Hodson R.E. Depletion of <sup>13</sup>C in lignin and its implications for stable carbon isotope studies // Nature. 1987. V. 329. P. 708–710. <https://doi.org/10.1038/329708a0>
  24. Clymo R.S. The limits to peat bog growth // Philos. T. R. Soc.-B. 1984. V. 303. P. 605–654. <https://doi.org/10.1098/rstb.1984.0002>
  25. Gabov D., Yakovleva E., Vasilevich R. Vertical distribution of PAHs during the evolution of permafrost peatlands of the European arctic zone // Applied Geochemistry. 2020. P. 104790. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104790>
  26. de Souza M.R., da Silva F.R., de Souza C.T. et al. Evaluation of the genotoxic potential of soil contaminated with mineral coal tailings on snail *Helix aspersa* // Chemosphere. 2015. V. 139. P. 512–517. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.07.071>

27. Flanagan N.E., Wang H., Winton S. et al. Low-severity fire as a mechanism of organic matter protection in global peatlands: Thermal alteration slows decomposition // *Global Change Biology*. 2020. V. 26. Iss. 7. P. 3930–3946.  
<https://doi.org/10.1111/gcb.15102>
28. Hornibrook E.R.C., Longstaffe F.J., Fyfe W.S., Bloom Y. Carbon-isotope ratios and carbon, nitrogen and sulfur abundances in flora and soil organic matter from a temperate-zone bog and marsh // *Geochem. J.* 2000. V. 34. P. 237–245.  
<https://doi.org/10.2343/geochemj.34.237>
29. Jones M.C., Peteet D.M., Sambrotto R. Late-glacial and Holocene  $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  variation from a Kenai Peninsula, Alaska peatland // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2010. V. 293. № 1–2. P. 132–143.  
<https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.05.007>
30. Khaustov A., Redina M. Fractioning of the polycyclic aromatic hydrocarbons in the components of the non-equilibrium geochemical systems (thermodynamic analysis) // *Applied Geochemistry*. 2020. V. 120. P. 104684.  
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104684>
31. Krüger J.P., Leifeld J., Glatzel S. et al. Biogeochemical indicators of peatland degradation—a case study of a temperate bog in northern Germany // *Biogeosciences*. 2015. V. 12. P. 2861–2871.  
<https://doi.org/10.5194/bg-12-2861-2015>
32. Krüger J.P., Conen F., Leifeld J., Alewell C. Palsa uplift identified by stable isotope depth profiles and relation of  $\delta^{15}\text{N}$  to C/N ratio // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2017. V. 28. № 2. P. 485–492.  
<https://doi.org/10.1002/ppp.1936>
33. Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C., Budantseva N.A., Volkova Ye.M., Sulerzhitsky L.D., Chizhova Ju.N., Jungner H. Radiocarbon age and Holocene dynamics of palsa in the Usa River valley // *Doclady Earth Sciences*. 2002. V. 384. № 4. P. 442–447.
34. Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C., Jungner H., Budantseva N.A., Chizhova Ju.N. Radiocarbon chronology of Holocene palsa of Bol'shezemel'skaya tundra in Russian North // *Geography, Environment, Sustainability*. 2013. V. 6. № 3. P. 38–59.  
<https://doi.org/10.24057/2071-9388-2013-6-3-38-59>
35. Zeh L., Igel M.T., Schellekens J. et al. Vascular plants affect properties and decomposition of moss-dominated peat, particularly at elevated temperatures // *Biogeosciences*. 2020. V. 17. № 19. P. 4797–4813.  
<https://doi.org/10.5194/bg-17-4797-2020>
36. Zuo S., Li R., Xie S. et al. Paleofire Indicated by Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil of Jinluojia Archaeological Site, Hubei, China // *J. Earth Science*. 2010. V. 21. № 3. P. 247–256.  
<https://doi.org/10.1007/s12583-010-0089-x>

## Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Carbon Isotopes in Palsa Peat (Bol'shezemel'skaya Tundra)

Yu. K. Vasil'chuk<sup>1,\*</sup>, A. D. Belik<sup>1</sup>, N. A. Budantseva<sup>1</sup>, A. N. Gennadiyev<sup>1</sup>, A. C. Vasil'chuk<sup>1</sup>,  
J. Yu. Vasil'chuk<sup>1</sup>, Ju. A. Zavgorodnyaya<sup>1</sup>, A. P. Ginzburg<sup>1</sup>, and L. B. Bludushkina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

\*e-mail: vasilch\_geo@mail.ru

The content of polycyclic aromatic hydrocarbons and the isotopic composition of carbon in peat of the palsa mound near Eletsy, Vorkuta urban district, Komi Republic. The carbon isotopic composition of peat varies from  $-28.05$  to  $-30.05\text{‰}$  (average value is  $-29.15\text{‰}$ ). The total PAH content varies from 11 to 360 ppb, with an average value of 60 ppb and a median of 34 ppb. Among PAHs, heavy compounds predominate, such as benzo(a)anthracene, benzofluoranthenes. The input of PAHs into peat material is regulated by three main factors: technogenic impact, natural fires, and biogeochemical soil processes. In the upper part of the peat mound, to the depth of the seasonally thawed layer, the predominance of benzo(a)anthracene marks the anthropogenic impact (the influence of transport and domestic fuel combustion). Below, the proportion of benzo(a)anthracene decreases, the proportion of benzofluoranthenes increases, while two sharp maxima of PAHs (260 ppb and 360 ppb) are observed, coinciding with a local increasing of the  $\delta^{13}\text{C}$  value and, probably, resulting from wildfires. The PAH concentration at minimal points is most likely due to the biogeochemical factor and the input of polyarenes during the decomposition of plant residues. The isotopic composition of peat carbon mainly reflects the isotopic composition of vegetation, the degree of moisture in the peat, as well as the influence of the pyrogenic factor.

**Keywords:** Polyarenes, paleoenvironment, wildfires, stable isotopes of carbon