

Отражение в изотопном составе торфа фаз развития бугристых ландшафтов Большеземельской тундры

Буданцева Надежда Аркадьевна

кандидат географических наук

старший научный сотрудник, географический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ)

119992, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, стр. 19

✉ nadin.budanceva@mail.ru



Чижова Юлия Николаевна

кандидат географических наук

старший научный сотрудник, географический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ)

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1 стр. 19, оф. 7

✉ eacentr@yandex.ru



Васильчук Юрий Кириллович

доктор геолого-минералогических наук

профессор, географический факультет Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1 стр. 19, оф. 7

✉ vasilch_geo@mail.ru



Аннотация. Объектами исследований являются торфяные бугры пучения на северо-востоке Большеземельской тундры, Для исследования выбраны бугры пучения, находящиеся на разных стадиях развития – от молодых растущих до зрелых и разрушенных. Зрелые бугры пучения имеют высоту от 3 до 4,7 м, некоторые из них имеют признаки первичного разрушения в виде пятен оголенного торфа или трещин на поверхности. Высота молодых бугров пучения, как правило, не превышает 1,5-2 м, разрушенные бугры имеют вид торфяного вала, окружающего понижение. Мощность торфа, перекрывающего бугры, варьирует от 0,8 до 1,2 м на зрелых буграх до 0,3-0,6 м в пределах разрушенных бугров. Был выполнен отбор (с шагом 5-10 см) образцов торфа на буграх и в межбугровых понижениях. Выполнено определение радиоуглеродного возраста, содержания углерода и азота, изотопный состав углерода торфа. Радиоуглеродное датирование показало, что исследованные бугры пучения формировались в период голоценового оптимума, наиболее высокие крупные бугры формировались между 7,7 и 4,8 тыс. лет назад. Показано, что в пределах исследуемых бугристых массивов в голоцене неоднократно изменялись условия обводнения, менялся состав растительного покрова, варьировали температуры периодов вегетации. Аккумуляция торфа происходила преимущественно в условиях повышенной обводненности массивов, многолетнемерзлое состояние торфа определило низкую степень его разложению и гумификации. Как для

периода голоценового оптимума, так и в настоящее время отмечено циклическое развитие бугров пучения, что обусловлено как общими климатическими изменениями (температура воздуха и снежность зим), так и локальными факторами, например, изменениями увлажненности массивов.

Ключевые слова: бугры пучения, торф, углерод, азот, изотопный состав, динамика, голоцен, радиоуглеродный возраст, условия аккумуляции, стадии развития.

УДК: 551.345

DOI: 10.7256/2453-8922.2016.1.21420

Дата направления в редакцию: 14-12-2016

Дата публикации: 16-12-2016

Budantseva N.A., Chizhova Ju.N., Vasil'chuk Yu.K. 2016. Reflection in the isotopic composition of the peat development phases of palsa landscapes of the Bolshezemelskaya tundra. *Arctic and Antarctic*. N1. P. 18—31.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 14-05-00842 и 16-05-00977

Введение

Миграционные торфяные бугры пучения (пальза) широко распространены на территории российской криолитозоны. Они встречены и изучены на севере Европейской части России, в Западной и Средней Сибири, Восточной Сибири. Показано их распространение на Чукотке, Камчатке, Сахалине, Дальнем Востоке и Забайкалье [2, 3, 5, 6]. Бугры пучения являются одним из наиболее характерных криолитологических явлений и надежным индикатором наличия многолетнемерзлых пород на южной границе их распространения. Анализ ареалов бугров пучения в криолитозоне Восточной Сибири и Дальнего Востока позволил выявить районы, для которых зарождение и развитие бугров не рассматривалось. Так, показано, что в резко континентальных условиях Забайкалья могут формироваться миграционные бугры пучения даже при отсутствии торфа на поверхности грунтов. Например, массив с такими буграми пучения расположен на поверхности увлажненной поймы озера Арахлей, в Южном Забайкалье (52° с.ш., 113° в.д.). Формирование миграционных бугров пучения отмечено близ пос. Чара в Забайкалье, на заболоченных участках, которые образуются в результате ухудшения условий дренирования вдоль железнодорожной трассы, хотя обычно бугры здесь формируются на мерзлых торфяниках в результате образования мощных линз инъекционного льда.

Показано формирование многолетних выпуклых миграционных бугров пучения на острове Сахалин, на широтах 49-50°с.ш. В столь южных районах не предполагалось развитие мерзлотных пучинистых форм. Так, например, при разработке масштабных проектов "Сахалин-1" и "Сахалин-2" по добыче и транспортировке нефти и газа. Территории, на которых ведутся работы, попадают в зону спорадического распространения многолетнемерзлых пород и, в частности, бугристых торфяников, что никак не было учтено при разработке указанных проектов. Это привело к возникновению напряженного состояния трубопроводов там, где этого не ожидалось. Единичные мерзлые бугры пучения встречены далеко за пределами южной границы их основного распространения.

Современная динамика бугров пучения в разных районах различна и также не всегда определяется влиянием климатических условий. На юге Якутии,

несмотря на существенное потепление климата в последние десятилетия, сохранилась высокая термическая устойчивость многолетнемерзлых пород, что объясняется большой изменчивостью толщины снега и преимущественной ролью зимнего охлаждения и характера снегоотложений в формировании среднегодовых температур грунтов. Тем не менее, в результате избыточного накопления снега вдоль линейных сооружений происходит деградация бугристых массивов, как, например, вдоль трассы ВСТО-1. В благоприятных условиях (например, на поймах рек) происходит зарождение и современный рост бугров пучения.

Изотопный анализ углерода торфа мерзлых торфяников активно применяется в мире для выявления степени и интенсивности разложения торфа, (особенно в процессе деградации многолетнемерзлых пород в результате потепления климата), поскольку мерзлые торфяники и торфяные бугры пучения являются природным резервуаром углерода и играют важную роль в процессах глобального круговорота углерода.

Район исследований и отбор образцов

Выпуклобугристые торфяники исследованы в долине р.Усы в Большеземельской тундре (рис. 1). Исследованные бугры пучения находятся на разных стадиях развития – от молодых растущих до зрелых и разрушенных.



Рис. 1. Районы исследования бугров пучения на северо-востоке Большеземельской тундры

В пределах выпуклобугристого массива в районе пос.Никита (67°02' с.ш., 63°48' в.д.) распространены как крупные бугры высотой до 5-8 м, так и невысокие бугры высотой до 0,5-2,0 м (рис. 2, а). Детально исследованы бугры пучения высотой 4,7 и 3,5 м, перекрытые торфом мощностью около 0,8 м, с большим количеством древесных остатков (ветки, древесина).

В пределах выпуклобугристого массива в районе пос.Елецкая (67°16' с.ш., 63°39' в.д.) детально исследованы бугры пучения высотой от 1,5 до 4 м (рис. 2, б).



а



б

Рис. 2. Бугры пучения на северо-востоке Большеземельской тундры: а – в районе пос.Никита, б – в районе пос.Елецкий. Фото Н.Буданцевой

В пределах озерно-болотной котловины бугры пучения окружены обводненными понижениями, в которых произрастают, в основном осоки и злаки. Древесная растительность на исследованном участке произрастает только в краевой части котловины. Бугры сложены торфом с горизонтами хорошо сохранившихся древесных остатков (ветки, кора, древесина). Бугор пучения высотой 4 м размером 6х7 м, перекрыт торфом мощностью 1,15 м, бугор высотой 3,5 м перекрыт торфом мощностью 0,9 м, мощность торфа в соседнем бугре пучения высотой 3,5 м составляла 0,6 м на вершине и 0,5 м на склоне. Бугор высотой 3 м сложен слоями торфа черного, коричневого, рыжего и светлого, разной степени неоднородности и разложения с большим количеством плохоразложившейся древесины с корой и веточками. Мощность торфа более 0,6 м.

Бугор пучения высотой 1,5 м, предположительно растущий, сложен торфом темно- и светло-коричневым с большим количеством древесных остатков, разной степени разложения. Также исследован типичный разрушенный бугор пучения высотой около 2 м, представляющий собой понижение, лишенное растительного покрова, диаметром 4 м, глубиной относительно окружающего кольцевого вала (пьедестала) 0,3 м. Мощность торфа в центральной части варьирует от 0,25 до 0,5 м, он подстилается суглинком. Большая мощность сезонно-талого слоя (более 0,7-0,8 м), благоприятствует произрастанию берез на поверхности бугра. Из торфа, перекрывающего бугры пучения, были отобраны образцы с интервалом 3-10 см, в которых выполнено определение изотопного состава углерода, определение процентного содержания углерода и азота. Из наиболее репрезентативных бугров пучения отобраны образцы торфа для радиоуглеродного датирования.

Методы измерений

Образцы торфа были высушены при температуре 50°C в течение 72 ч, затем измельчены до состояния пудры. В лаборатории геохимии ландшафтов кафедры геохимии ландшафтов и географии почв Географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова были выполнены измерения процентного содержания азота и углерода в торфе. Измерения проводились на CHNS-анализаторе VARIO EL III V4.01 20.Aug. 2002, Elementar Analysen systeme GmbH, Германия. В качестве стандарта была использована сульфаниловая кислота (Merck) со значениями N = 8,090%, C = 41,610%.

Определения изотопного состава углерода выполнены в изотопной лаборатории географического факультета МГУ на масс-спектрометре Delta-V со стандартной опцией элемент-анализатор. Для измерений использованы международные стандарты IAEA-CH-3 (значение $\delta^{13}\text{C} = -24,724\text{‰}$) и IAEA-CH-6 (значение $\delta^{13}\text{C} = -10,449\text{‰}$). Точность определений $\delta^{13}\text{C}$ составила $\pm 0,2\text{‰}$.

Радиоуглеродное датирование торфа выполнено в лабораториях Хельсинского университета (Финляндия), Геологическом институте РАН и Институте материальной культуры (Россия).

Результаты и обсуждение *¹⁴C возраст торфа бугров пучения*

Радиоуглеродное датирование показало, что исследованные бугры пучения формировались в период голоценового оптимума.

В разрезе бугра высотой 4,7 м у поселка Никита на начало пучения и формирования бугра указывает переход от торфа, сформировавшегося 8,2-7,5 тыс. лет назад в условиях лесного хвощового болота (в интервале глубин 0,80-0,65 м) к торфу с высоким содержанием остатков деревьев (что, возможно, указывает на частичное осушение участка) на глубине 0,65 м, сформировавшемуся около 5,3 тыс. лет назад. В толще торфа, перекрывающего бугор пучения высотой 3,5 м древесина и остатки крупных кустарников с глубины 0,4-0,5 м указывают на субэральные условия развития торфяника и начало пучения и датированы возрастом 6,3-6,1 тыс. лет.

В районе пос.Елецкий в торфе бугра пучения высотой 4 м начало пучения и завершение субаквальной фазы развития бугра было выделено на глубине 0,3 м и датировано в 4,8 тыс. лет назад. Последующая субэральная фаза длилась менее 5 тыс. лет. В толще торфа бугра пучения высотой 3,5 м по датировке 7,42–7,12 тыс. лет назад фиксируется осушение массива в результате начавшегося пучения [6, с. 66-67]. Скорее всего, особенно интенсивно процесс пучения близ пос.Елецкий происходил 7,7-6,2 тыс. лет назад бугры поднялись над поверхностью на 3-3,4 м.

Полученные в 2016 г. новые ¹⁴C датировки по торфу бугров пучения в районе пос.Елецкий подтвердили их голоценовый возраст: торф бугра пучения высотой 3 м датирован от 1,4 тыс. лет на вершине до 6,4 тыс. лет в нижней части горизонта; торф бугра пучения высотой 1,5 м датирован от 1,7 до 6,4 тыс. лет; более древний возраст имеет торфяной слой, перекрывающий разрушенный бугор пучения кольцевидной формы – от 2,7 до 7,8 тыс. лет.

Голоценовый возраст бугров пучения Большеземельской тундры был показан и другими исследователями. Миграционные бугры и площади пучения вдоль южной границы их распространения на северо-востоке Европейской части России

исследовали П. Оксанен и П. Курри с соавторами [12], между реками Большая Роговая и Большая Пятомбью в Ненецком автономном округе (в Архангельской области, в нескольких километрах от границы с Республикой Коми). Радиоуглеродные датировки по этому району Большеземельской тундры характеризуют достаточно молодой голоценовый массив пучения, в котором имеются разновозрастные бугры: наиболее древние бугры не старше 2,2 тыс. лет, а самые молодые - не старше 160 лет.

По данным Х. Сеппа с соавторами [13, 16] в бассейне р.Печора похолодание климата около 3,5–2,5 тыс. лет привело к активному формированию здесь многолетнемерзлых пород и интенсивному росту бугров пучения, а также к отмиранию древесной растительности, наиболее древние остатки которой датированы возрастом 2,5 тыс. лет.

Содержание азота и углерода в торфе бугров пучения в районе пос.Елецкий

Анализ торфа на содержание углерода и азота показало, что содержание углерода в торфе варьирует от 43 до 54%, азота – от 1,1 до 3,2%. Выявлено, что торф на буграх пучения характеризуется более высокими значениями содержания углерода и азота, чем современная растительность и торф увлажненных межбугровых понижений.

В двух зрелых буграх отмечается близкое распределение N в шурфах, заложенных и на вершине и на склоне. На вершине бугра высотой 3 м содержание N варьирует от 1,48 до 2,94%, среднее значение составляет 2,03%. Минимальное значение 1,48% характерно для верхнего горизонта 0-6 см, пронизанного корнями современных растений. Также низкое содержание азота отмечено на глубине 46-48 см в слое торфа, насыщенного плохоразложившимися древесными остатками. В целом по разрезу отмечается тенденция увеличения концентрации азота с глубиной. В шурфе на склоне бугра на поверхности оголенного торфа, концентрации азота практически не меняются с глубиной при средней величине 2,5% (максимальное значение 2,9%), за исключением горизонта торфа с глубины 30-35 см с большим количеством древесины с корой, где концентрация азота наименьшая по разрезу - 0,57% (рис. 3).

На вершине бугра высотой 3,5 м содержание N варьирует от 1,13 до 2,79%, среднее значение составляет 2,3% (рис. 3, а, б). Также минимальное значение содержания азота отмечено в верхнем горизонте 0-10 см с многочисленными корнями растущих на бугре мха и морошки. По разрезу наблюдается увеличение содержания органического азота до глубины 25 см, затем однородное распределение до глубины 60 см и уменьшение концентрации в нижнем горизонте (на глубине 67 см 1,78%). В шурфе на склоне бугра (заложенном на оголенном пятне торфа), значения довольно однородные, варьируют от 2,12 до 2,55% без выраженной зависимости от глубины.

В торфе небольшого бугра высотой 1,5 м отмечены наибольшие концентрации азота: содержание N варьирует от 2,28 до 3,09%, среднее = 2,63%, максимальные концентрации отмечены для двух верхних горизонтов от 0 до 6 см, а затем концентрации плавно уменьшаются с глубиной (рис. 3, в).

В пределах разрушенного бугра пучения высотой 2 м содержание N в торфе варьирует от 1,85 до 2,82%, минимум отмечается в придонном горизонте торфа. В шурфе на пятне оголенного торфа содержание азота снижается с глубиной от 2,1-

2,5% в верхних 10 см торфа до 1,6% в нижнем горизонте торфа с прослоями суглинка (рис. 3, г, д).

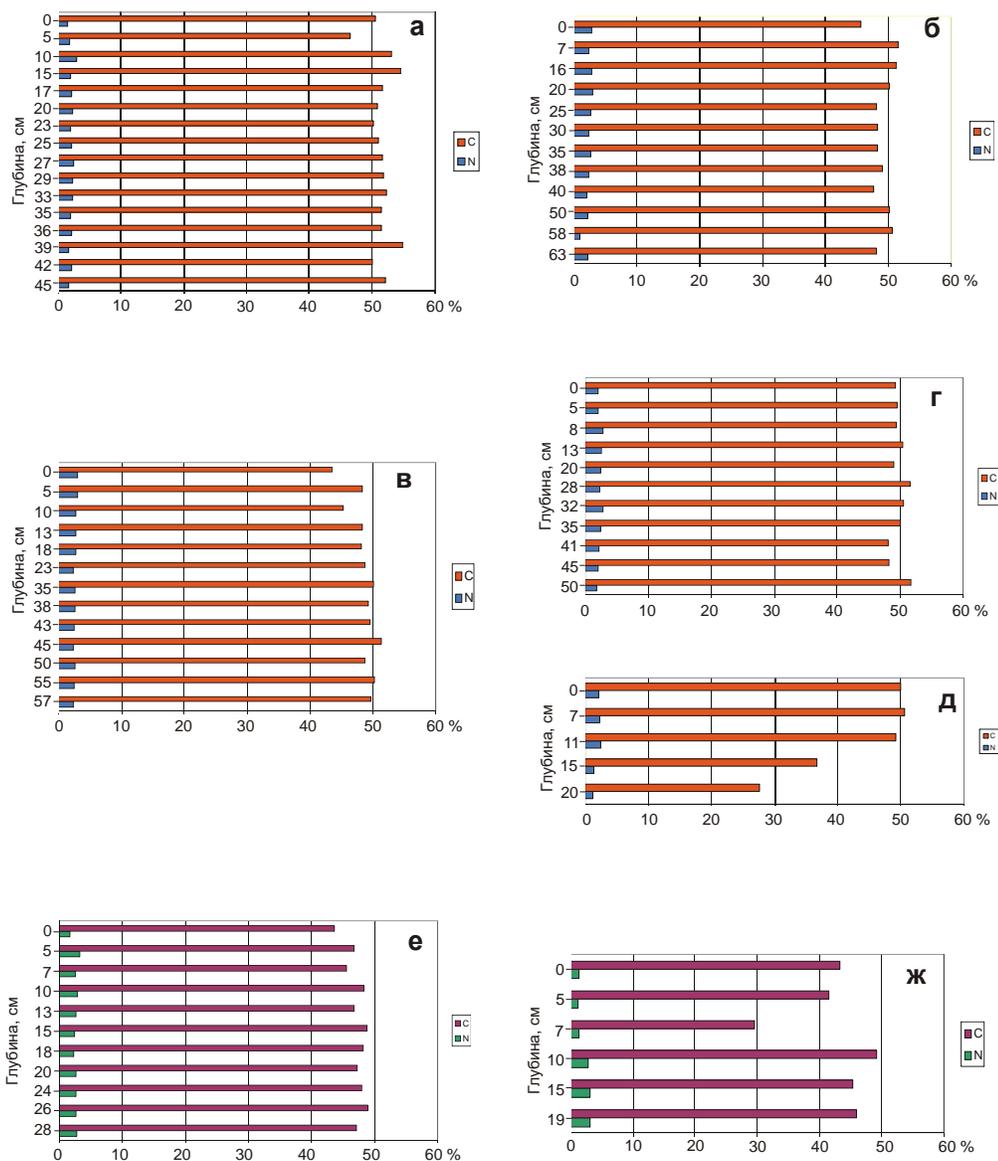


Рис. 3. Распределение содержания азота (N) и углерода (C) в торфе бугров пучения в районе пос.Елецкий, северо-восток Большеземельской тундры. Бугор пучения высотой 3,5 м: а - вершина бугра, б - склон бугра; в - бугор пучения высотой 1,5 м; разрушенный бугор пучения с кольцевым валом - г, д - шурфы на кольцевом валу; е - слабо увлажненное межбугровое понижение, ж - сильно увлажненное межбугровое понижение

В более обводненном межбугровом понижении в торфе с глубины 0-10 см содержание N составило 1,65%, в наименее обводненном межбугровом понижении в поверхностном торфе 0-10 см содержание N = 1,28%, а между этими двумя точками было отобрано два образца с глубин 0-10 и 15-17 см - содержание N в верхнем образце 1,23%, в нижнем - 3,12% (рис. 3, е, ж).

Содержание углерода в современной растительности с поверхности бугра пучения высотой 3,5 м варьировало в более широком диапазоне – от 38 до 53%. В увлажненном межбугровом понижении современные мхи и злаки характеризовались значениями С 42-43%. В торфе на вершине бугра пучения высотой 3,5 м отмечены в целом наиболее высокие значения С, составляющие в среднем 50-52%, торф на склоне бугра характеризовался вариациями в содержании С от 47 до 51%. В торфе невысокого бугра (выс. 1,5 м) содержание С по глубине варьировало от 43 до 51%, при этом минимальное значение отмечено в поверхностном торфе, пронизанном современными корнями растений, максимальное – в прослоях торфа с остатками плохо разложившейся древесной коры.

В торфе кольцевого вала разрушенного бугра содержание С варьировало от 48 до 50%, торф в пределах оголенного пятна внутри кольцевого вала характеризовался значениями С 48-50% в верхней части, при этом в нижних горизонтах торфа с примесью суглинка в верхней части значение содержания С снизилось до 36-27% (см. рис. 3).

Полученные значения содержания азота и углерода в торфяном покрове бугров пучения указывают на накопление слабогумифицированного органического вещества, т.е. на низкую степень разложения торфа.

Распределение значений $\delta^{13}\text{C}$ в торфяниках

Определение изотопного состава углерода торфа, перекрывающего бугры пучения, было применено для выявления условий формирования торфа и динамики бугров пучения как форм рельефа. С.Алевель с соавторами [8] исследовали состояние и динамику бугров пучения в пределах болот северной Швеции, в долине Абиско. В торфяных горизонтах ими были выделены слои, характеризующиеся повышенными значениями $\delta^{13}\text{C}$, отвечающим условиям аэробного разложения торфа на поверхности выпуклого бугра, т.е. стадии пучения и поднятия поверхности бугра над обводненным понижением. Было показано, что значения $\delta^{13}\text{C}$ варьируют в основном от -20‰ в олиготрофных мхах до -29‰ в эвтрофных осоках. В разрезе торфа одного из бугров значения $\delta^{13}\text{C}$ изменялись от $-29,2\text{‰}$ в поверхностном торфе до $-25,5\text{‰}$ на глубине 5-25 см и с глубиной снова снижались до $-28, -29\text{‰}$. Более высокие значения $\delta^{13}\text{C}$ на глубине 5-25 см маркируют процесс пучения и образования бугра, датированного от 150 до 700 лет назад. Вертикальное распределение значений $\delta^{13}\text{C}$ торфа отражает динамику органического вещества при повышении значений $\delta^{13}\text{C}$ в течение аэробного разложения и снижения значений в процессе анаэробного разложения. Профили распределения значений $\delta^{13}\text{C}$ в разрушающихся буграх пучения и буграх, находящихся в стабильном состоянии, а также в межбугровых понижениях были получены для трех торфяных болот северной Швеции с целью выявить процессы деградации торфяников. Изотопные профили показали четкое различие между нарушенными и ненарушенными буграми пучения. Эрозия и криотурбация привели к существенному изменению изотопно-углеродных профилей.

В ненарушенном бугре поднятие торфа в результате пучения фиксируется измерением тренда распределения значений $\delta^{13}\text{C}$ и изменением соотношений С/Н. Для межбугровых понижений изотопные тренды менее выражены, но по некоторым понижениям и эродированным понижениям выявлены различия в изотопных профилях, что указывает на усиление процессов разложения. По изотопно-углеродным профилям можно проследить деградацию бугристых торфяников в результате протаивания многолетнемерзлых пород и изменения

рельефа бугров. В ненарушенных буграх пучения вертикальные профили значений $\delta^{13}\text{C}$ отражают изменение процессов разложения торфа в результате пучения торфяников. Исследования Дж.П.Крюгера с соавторами [10] показали, что вертикальные изотопно-углеродные профили торфа в ненарушенных буграх пучения показывают два тренда: повышение значений $\delta^{13}\text{C}$ от поверхности до некоторой глубины ("поворотная точка"), затем снижение значений до основания торфяного слоя. В разрушенных буграх пучения такого распределения значений $\delta^{13}\text{C}$ не прослеживается, изотопный профиль имеет равномерный характер, что отражает процессы деградации и криотурбации. Тренд повышения значений $\delta^{13}\text{C}$ с глубиной, наиболее вероятно, отражает период поднятия поверхности бугра над окружающим болотом с аэробным типом разложения в верхней части и анаэробным – в нижней части. Это предположение поддерживается более высокими значениями соотношения C/N над "поворотной точкой" и более низкими значениями - ниже нее, отражая омботрофные и минеротрофные условия, соответственно. Для пяти из шести изученных разрушающихся межбугровых понижений получены ожидаемые изотопные профили: снижение значений $\delta^{13}\text{C}$ с глубиной, что указывает на аккумуляцию неразложившегося материала с глубиной как результат анаэробной деградации в исследуемых торфяниках.

Наши исследования показали, что не все бугры пучения характеризуются наличием контрастного распределения значений изотопного состава углерода, отражающего смену условий торфонакопления и процесс пучения. Так, по торфу бугров пучения в районе пос.Елецкий получены в целом довольно низкие значения $\delta^{13}\text{C}$ – в торфе всех исследованных бугров они варьировали в основном в диапазоне от -28 до -30‰ . В торфе бугра пучения высотой 3,5 м выделены несколько положительных пиков значений $\delta^{13}\text{C}$ – до -26‰ , -27‰ , на глубине 7 см на вершине бугра (рис. 4, а) и на глубинах 30 и 60 см – в торфе на склоне бугра (рис. 4, б). В торфе бугра пучения заметный изотопный сдвиг выявлен в шурфе на склоне: на глубине 20-10 см значения $\delta^{13}\text{C}$ варьировали от $-29,9$ до $-27,9\text{‰}$ (рис. 4, г). Незначительные вариации изотопного состава углерода отмечены в торфяном слое бугра пучения высотой 1,5 м и разрушенного бугра (рис. 4, д-ж). Такое распределение значений $\delta^{13}\text{C}$ в торфе разрушенного бугра, по мнению П.Крюгера с соавторами, может объясняться криотурбациями и перемешиванием горизонтов торфа в процессе протаивания и проседания. Довольно контрастное распределение значений изотопного состава углерода отмечено для торфа межбугровых понижений – значения $\delta^{13}\text{C}$ варьируют от $-25,5\text{‰}$ до -30‰ (рис. 4, з, и), что, возможно, отражает смешение современной растительности (для которой на исследуемом участке получены значения $\delta^{13}\text{C}$ от $-25,7\text{‰}$ до $-32,2\text{‰}$), и торфа, сносимого с поверхности бугров в результате водной или ветровой эрозии.

Полученные данные изотопного состава углерода торфа, наряду с данными по содержанию азота и углерода, отражают в целом анаэробную обстановку торфонакопления, низкую степень разложения, что может быть обусловлено высокой степенью увлажненности торфяных массивов в период аккумуляции торфа.

В торфе бугра пучения высотой 3,5 м в районе пос.Никита были получены более контрастное распределение значений $\delta^{13}\text{C}$: от $-28,6\text{‰}$ в приповерхностном кустарничковом торфе с глубины 0,2 м до $-25,5\text{‰}$ в горизонте, сложенном остатками древесины и кустарников на глубине 0,4-0,5 м, вниз по разрезу значения $\delta^{13}\text{C}$ снова понизились до $-29,9\text{‰}$ в древесном торфе (глубина 0,6 м) и до $-28,6\text{‰}$ в придонном древесно-хвощевом торфе (рис. 4, к).

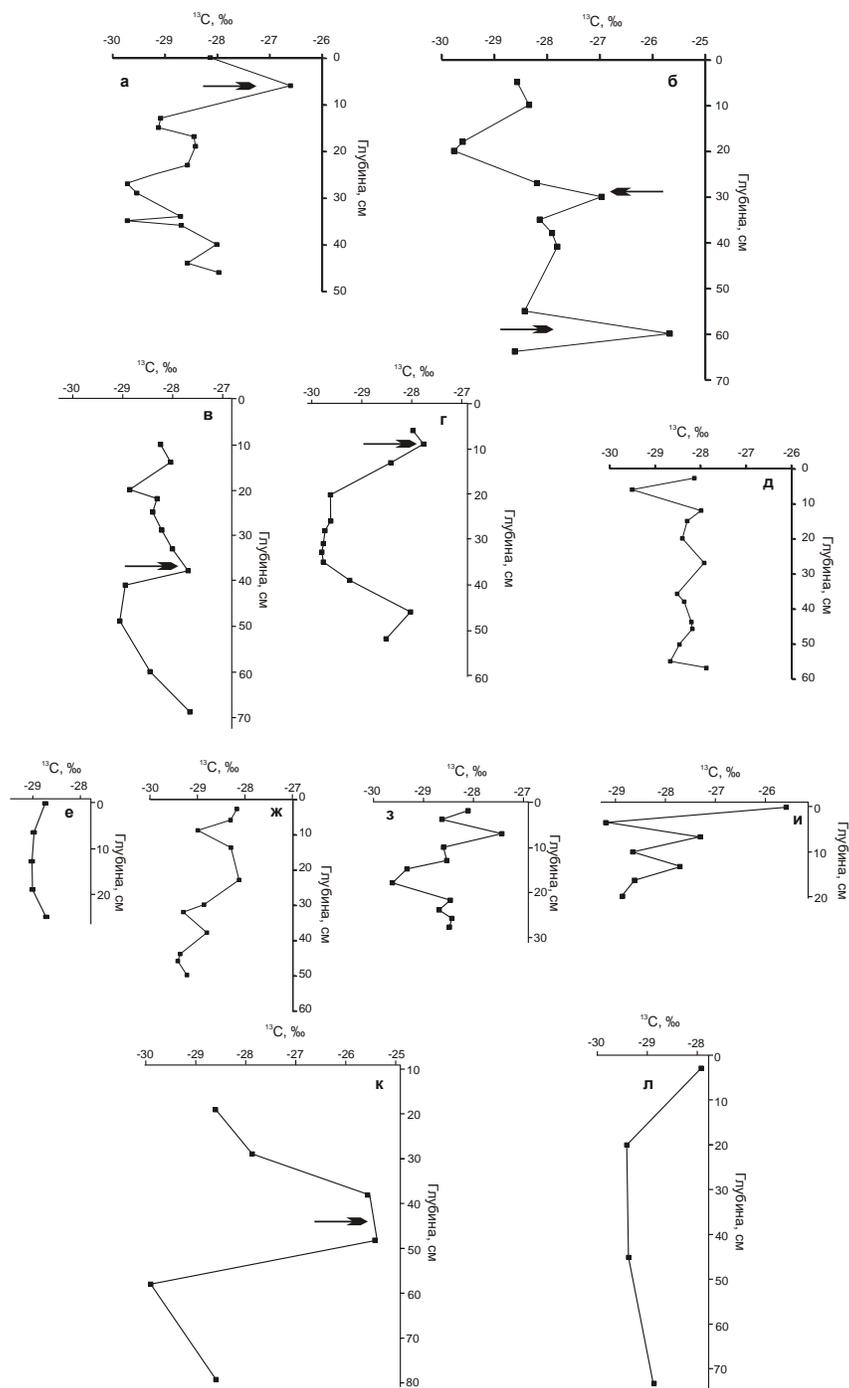


Рис. 4. Распределение значений $\delta^{13}\text{C}$ в торфе, перекрывающем бугры пучения, северо-восток Большеземельской тундры: а – и – бугры в районе пос.Елецкая. Бугор пучения высотой 3,5 м: а – вершина бугра, б – склон бугра; бугор пучения высотой 3 м: в – вершина бугра, г – склон бугра, д – бугор пучения высотой 1,5 м; е, ж – кольцевой вал разрушенного бугра пучения высотой 1,5 м; межбугровые понижения: з – слабоувлажненное, и – сильноувлажненное. Пос.Никита: к – бугор пучения высотой 3,5 м, л – бугор пучения высотой 4,7 м. Стрелками показаны периоды изменения условий аккумуляции и разложения торфа

Наличие положительного изотопного пика можно рассматривать как смену режима обводнения и переход от анаэробных условий (при которых формировался торф с более легким изотопным составом углерода) к аэробным условиям формирования торфа (более тяжелый изотопный состав) в результате поднятия поверхности торфяника вследствие пучения. Полученные данные отражают циклический характер развития бугра: после термокарстовой переработки и протаивания бугра, происходило осушение массива и повторное пучение [1].

По торфу бугра пучения высотой 4,7 м в районе пос.Никита были получены довольно низкие значения $\delta^{13}\text{C}$ – от $-27,9$ до $-29,8\text{‰}$ (рис. 4, л), что скорее всего, указывает на высокую степень обводнения массива в процессе аккумуляции торфа и преимущественно анаэробные условия его разложения даже после поднятия бугра.

Полученные данные по вариациям изотопного состава углерода торфа, содержанию углерода и азота дают основание предполагать, что в пределах исследуемых бугристых массивов в голоцене неоднократно изменялись условия обводнения, менялся состав растительного покрова, варьировали температуры периодов вегетации. Наличие в торфе горизонтов, представленных древесными остатками, указывает на периодическое облесение данных участков. В целом можно отметить, что аккумуляция торфа происходила в условиях повышенной обводненности массивов, многолетнемерзлое состояние торфа определило низкую степень его разложению и гумификации. Влияние условий увлажнения и летних температур было показано на примере сезонно- и многолетнемерзлых торфяников. Влияние изменения условий окружающей среды (например, степень увлажненности болот), влияющие на процессы разложения торфа были показаны для торфяников южной Патагонии, Аргентина на основании исследования вертикальных профилей значений $\delta^{13}\text{C}$ торфа [9].

П.К.Тиллман с соавторами [15] показали, что изотопный состав углерода и кислорода отдельных растительных фракций сфагнового торфа является хорошим инструментом для выявления изменений условий окружающей среды. Исследования показали хорошую корреляцию между значениями $\delta^{13}\text{C}$ целлюлозы стеблей сфагнома, собранного на бугристых торфяниках в Канаде, и летними температурами, особенно июльскими: более низкие значения $\delta^{13}\text{C}$ соответствуют более низким значениям температуры.

Особенности современной динамики бугров пучения

Принято считать, что в районах, где среднегодовая температура многолетнемерзлых пород близка к 0°C бугры пучения могут быть хорошими геоморфологическими индикаторами изменения климата, т.к. даже незначительные изменения климата небольшой продолжительности могут быть существенны для роста и распада этих мерзлотных форм рельефа. Однако не всегда рост и деградация бугров есть исключительно функция температурных изменений и неверно ожидать прямой корреляции тенденций изменения температуры воздуха с динамикой бугров пучения.

На самом деле, связь эта значительно сложнее, и повышение летних температур далеко не всегда сопровождается ростом и зимних температур воздуха, а тем более, ростом температур мерзлых грунтов, когда улучшение условий вегетации ведет к бурному росту мохово-травяного покрова, который служит хорошим изолятором тепла. Таким образом, даже при росте температур

воздуха может значительно усиливаться выхолаживание грунта, и, как результат, вместо деградации мерзлых пород будет наблюдаться их активное развитие и интенсивный рост бугров пучения на торфяниках. На это указывают и результаты прямого мониторинга в разных регионах северного полушария. Существенные изменения бугров пучения в большинстве районов криолитозоны происходят за десятки лет, а иногда за первые годы, хотя скорости деградации и роста бугров обычно отличаются. Рост бугров в среднем происходит со скоростью от 2-3 до 25 см в год, при этом скорость деградации может превышать 10-15 см в год. Высокие скорости роста бугров характерны для начальной стадии, когда в течение нескольких сезонов бугры могут вырасти на 1-1,5 м. Прямыми инструментальными наблюдениями установлены скорости деградации и роста бугров пучения в ряде районов криолитозоны. На севере Западной Сибири в районе Надыма приращение бугров в высоту за 24 года наблюдений (с 1980 по 2004 гг.) характеризовалось разными скоростями – для периода с 1988 по 1998 гг. в среднем 4 см/год, с 1995 по 1998 гг. – 10 см/год, а на одном из участков величина пучения в период между 1998 и 2000 гг. составила 45 см. [7]. В Канаде в долине р.Бонифейс в северном Квебеке с 1993 по 2003 гг. высота некоторых бугров составила около 40% от первоначальной высоты.

Отмечен также рост бугров в отдельные сезоны – так, например, отдельные бугры высотой до 1 м сформировались на Юконе за период с 1995 по 2001 гг. [17]. В Швеции отмечен рост отдельных бугров и деградация со скоростью 1,8 м за пять лет (с 1996 по 2000 гг.); средняя скорость деградации бугров пучения в Скандинавии в целом составляет 10 см/год (с 1967 по 1997 гг. полностью исчезли бугры высотой 3 м) [11, 18, 14]. Причинами роста и деградации бугров как в зоне сплошного, так и в зоне прерывистого распространения многолетнемерзлых пород являются как общие климатические изменения (температура воздуха и снежность зим), так и локальные факторы – изменение дренажной системы, колебания уровня рек, осушение озер. Даже в пределах одного и того же массива скорости накопления торфа, моменты пучения и длительности субаэральной и субаквальной фаз могут не совпадать. Но при рассмотрении большого массива данных можно выделить этапы интенсификации и относительного затухания процессов пучения [4].

Выводы

1. Бугры пучения на северо-востоке Большеземельской тундры активно формировались и в период голоценового оптимума, формируются они и в настоящее время.
2. Исследованные бугры пучения находятся на разных стадиях развития – от молодых растущих до зрелых и разрушенных.
3. В пределах исследуемых бугристых массивов в голоцене неоднократно изменялись условия обводнения, менялся состав растительного покрова, варьировали температуры периодов вегетации.
4. Аккумуляция торфа в пределах исследуемых районов происходила преимущественно в условиях повышенной обводненности массивов, многолетнемерзлое состояние торфа определило низкую степень его разложению и гумификации.
5. Как для периода голоценового оптимума, так и в настоящее время отмечено циклическое развитие бугров пучения, что обусловлено как общими климатическими изменениями (температура воздуха и снежность зим), так и локальными факторами, например, изменениями увлажненности массивов.

Библиография

1. Буданцева Н. А., Васильчук А. К., Чижова Ю. Н., Васильчук Ю. К. Распределение стабильных изотопов углерода в торфяниках выпуклобугристых и полигональных ландшафтов // *Естественные и технические науки*, 2015. № 11. С. 268–271.
2. Васильчук Ю. К., Буданцева Н. А., Васильчук А. К., Чижова Ю. Н., Станиловская Ю. В. Миграционные бугры пучения в криолитозоне Восточной Сибири и Дальнего Востока // *Инженерная геология*. 2014. №1. С. 30–54.
3. Васильчук Ю. К., Васильчук А. К., Буданцева Н. А., Йошикава К., Чижова Ю. Н., Станиловская Ю. В. Миграционные бугры пучения в южной части криолитозоны Средней Сибири // *Инженерная геология*. 2013. №3. С. 14–34.
4. Васильчук Ю. К., Васильчук А. К., Буданцева Н. А., Чижова Ю. Н. *Выпуклые бугры пучения многолетнемерзлых торфяных массивов*. Под ред. проф. Васильчука Ю.К. Изд-во Московского университета. 2008. 559 с.
5. Васильчук Ю. К., Васильчук А. К., Буданцева Н. А., Чижова Ю.Н. Миграционные бугры пучения на севере Западной Сибири: южный и северный пределы ареала и современная динамика // *Инженерная геология*. 2012. №3. С. 18–32.
6. Васильчук Ю. К., Васильчук А. К., Буданцева Н. А., Чижова Ю. Н. Миграционные бугры пучения на Европейском Севере России – южный и северный пределы ареала и современная динамика // *Инженерная геология*. 2011. №2. С. 56–72.
7. Пономарева О. Е. Мониторинг динамики поверхности бугров пучения вдоль трассы газопровода Надым-Пунга (северная тайга Западной Сибири) // *Материалы третьей конференции геокриологов России. МГУ им. М.В. Ломоносова, 1-3 июня 2005 г. Том 2. Ч.3. Динам. геокриол. Ч.4. Геоэкол. криолит*. Изд-во Моск. ун-та. 2005. С. 141–146.
8. Alewell, C., Giesler, R., Klaminder, J., Leifeld, J., Rollog M. Stable carbon isotopes as indicators for environmental change in palsa peats // *Biogeosciences*. 2011. Vol. 8. P. 1769–1778.
9. Broder T., Blodau C., Biester H., Knorr K. H. Peat decomposition records in tree pristine bogs in southern Patagonia // *Biogeoscience*. 2012. N 9. P. 1479-1491.
10. Krüger J. P., Leifeld J., Alewell C. Degradation changes stable carbon isotope depth profiles in palsa peatlands // *Biogeosciences*. 2014. N 11. P.3369-3380.
11. Nihlen T. Palsas in Harjedalen, Sweden: 1910 and 1998 compared // *Geografiska Annaler*. 2000. Vol. 82A. Iss 1. P. 39-44.
12. Oksanen P. O., Kuhry P., Alekseeva R. N., Kanev V. V. Permafrost dynamics at the Rogovaya River peat plateau, subarctic Russia // *Permafrost-Seventh International Conference, Proceedings*. Yellowknife (Canada), Collec. Nordicana No 55.1998. P. 847–854.
13. Salonen J. S., Seppä H., Valliranta M., et al. The Holocene thermal maximum and late-Holocene cooling in the tundra of NE European Russia // *Quaternary Research*. 2011. Vol. 75. Iss. 4. P. 100–111.
14. Seppälä M. Palsa mires in Finland // *The Finnish environment*. 2006. Vol. 23. P. 155-162.
15. Tillman P. K., Holzkämper S., Kuhry P., Sannel A. B. K., Loader N. J., Robertson I. Stable carbon and oxygen isotopes in Sphagnum fuscum peat from subarctic. Implication for palaeoclimate studies // *Chemical Geol.* 2010. N 270. P. 216–226.
16. Valliranta M., Kaakinen A., Kuhry P., et al. Scattered late-glacial and early Holocene tree populations as dispersal nuclei for forest development in north-eastern European Russia // *J. of Biogeography*. 2010. Vol. 38. Iss. 5. P. 922–932.
17. Vallee S., Payette S. Collapse of permafrost mounds along a subarctic river over the last 100 years (northern Quebec) // *Geomorphology*. 2007. Vol. 90 (1-2). P. 162–170.
18. Zuidhoff F. S. Recent decay of a single palsa in relation to weather conditions between 1996 and 2000 in Laivadalen, northern Sweden // *Geografiska Annaler. Series A, Phisycal Geography*. 2002. 84 A (2). P. 103–111.

References (transliterated)

1. Budantseva N. A., Vasil'chuk A. C., Chizhova Ju. N., Vasil'chuk Yu. K. Stable carbon isotopes in palsas and polygonal peat landscapes. *Raspredelenie stabil'nykh izotopov ugleroda v torfyanikakh vypuklobugrystykh i poligonal'nykh landshaftov // Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2015. № 11. S. 268–271.
2. Vasil'chuk Yu. K., Budantseva N. A., Vasil'chuk A. C., Chizhova Ju. N., Stanilovskaya Ju. V. Palsas in the Eastern Siberia and Far East permafrost zone. *Migratsionnye bugry pucheniya v kriolitozone Vostochnoi Sibiri i Dal'nego Vostoka // Inzhener. geol.* 2014. №1. S. 30–54.
3. Vasil'chuk Yu. K., Vasil'chuk A. C., Budantseva N. A., Yoshikawa K., Chizhova Ju. N., Stanilovskaya Ju. V. Palsas in the southern part of the Middle Siberia permafrost zone. *Migratsionnye bugry pucheniya v yuzhnoi chasti kriolitozony Srednei Sibiri // Inzhenernaya geologiya.* 2013. №3. S. 14–34.
4. Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C., Budantseva N.A., Chizhova Ju.N. Palsa of frozen peat mires. *Vypuklye bugry pucheniya mnogoletnemertzlykh torfyanykh mass. Izd-vo MGU.* 2008. 559 s.
5. Vasil'chuk Yu. K., Vasil'chuk A. C., Budantseva N. A., Chizhova Ju.N. Palsas in the north of Western Siberia: the southern and northern limits of the areal and the modern dynamics. *Migratsionnye bugry pucheniya na severe Zapadnoi Sibiri: yuzhnyi i severnyi predely areala i sovremennaya dinamika // Inzhenernaya geologiya.* 2012. №3. S. 18–32.
6. Vasil'chuk Yu. K., Vasil'chuk A. C., Budantseva N. A., Chizhova Ju. N. Palsas in the northern European Russia: the southern and northern limits of the areal and the modern dynamic. *Migratsionnye bugry pucheniya na Evropeiskom Severe Rossii – yuzhnyi i severnyi predely areala i sovremennaya dinamika // Inzhenernaya geologiya.* 2011. №2. S. 56–72.
7. Ponomareva O. E. Monitoring dinamiki poverkhnosti bugrov pucheniya vdol' trassy gazoprovoda Nadym-Punga (severnaya taiga Zapadnoi Sibiri) / *Materialy tret'ei konferentsii geokriologov Rossii. MGU.*, T.2. Ch.3. Dinam. geokri. Izd-vo Mosk. un-ta. 2005. S. 141–146
8. Alewell, C., Giesler, R., Klaminder, J., Leifeld, J., Rollog M. Stable carbon isotopes as indicators for environmental change in palsa peats // *Biogeosci.* 2011. Vol.8. P. 1769–1778.
9. Broder T., Blodau C., Biester H., Knorr K. H. Peat decomposition records in tree pristine bogs in southern Patagonia // *Biogeosciences.* 2012. N 9. P. 1479–1491.
10. Krüger J. P., Leifeld J., Alewell C. Degradation changes stable carbon isotope depth profiles in palsa peatlands // *Biogeosciences.* 2014. N 11. P.3369–3380.
11. Nihlen T. Palsas in Harjedalen, Sweden: 1910 and 1998 compared // *Geografiska Annaler.* 2000. Vol. 82A. Iss 1. P. 39–44.
12. Oksanen P. O., Kuhry P., Alekseeva R. N., Kanev V. V. Permafrost dynamics at the Rogovaya River peat plateau, subarctic Russia // *Permafrost-Seventh International Conference, Proceedings.* Yellowknife (Canada), Collec. Nordicana No 55.1998. P. 847–854.
13. Salonen J.S., Seppä H., Valliranta M. et al. The Holocene thermal maximum and late-Holocene cooling in the tundra of NE European Russia // *Quat.Res.* 2011.V.75(4). P.100–111.
14. Seppälä M. Palsa mires in Finland // *The Finnish environment.* 2006. Vol. 23. P. 155–162.
15. Tillman P. K., Holzkämper S., Kuhry P., Sannel A. B. K., Loader N. J., Robertson I. Stable carbon and oxygen isotopes in Sphagnum fuscum peat from subarctic. Implication for ppalaeoclimate studies // *Chemical Geol.* 2010. N 270. P. 216–226.
16. Valliranta M., Kaakinen A., Kuhry P., et al. Scattered late-glacial and early Holocene tree populations as dispersal nuclei for forest development in north-eastern European Russia // *J. of Biogeography.* 2010. Vol. 38. Iss. 5. P. 922–932.
17. Vallee S., Payette S. Collapse of permafrost mounds along a subarctic river over the last 100 years (northern Quebec) // *Geomorphology.* 2007. Vol 90. Iss. 1-2. P. 162–170.
18. Zuidhoff F. S. Recent decay of a single palsa in relation to weather conditions between 1996 and 2000 in Laivadalen, northern Sweden // *Geografiska Annaler. Series A, Phisycal Geography.* 2002. 84 A (2). P. 103–111.