

ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕРЗЛОТНЫХ ПОЧВ ОГОЛЕННЫХ ПЯТЕН НА ПЛОСКОБУГРИСТЫХ ТОРФЯНИКАХ БОЛЬШЕЗЕМЕЛЬСКОЙ ТУНДРЫ

© 2013 Д.А. Каверин, А.В. Пастухов

Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

Поступила в редакцию 17.10.2012

Охарактеризованы генетические особенности мерзлотных почв тундры, формирующихся в контурах оголенных торфяных пятен, приуроченных к плоскобугристым комплексам европейского Северо-Востока России. Исследованы морфологическое строение, гидротермические и основные физико-химические свойства торфяных мерзлотных поверхностно-криогенных почв пятен. Дана сравнительная характеристика исследуемых почв согласно двухкомпонентной системе «СТС-ММП», в разрезе катены «оголенное пятно – кустарничковая тундра». Оценено влияние ландшафтных факторов на формирование оголенных торфяных пятен. Показано, что формирование и существование торфяных пятен обусловлено активизацией криогенных и поверхностно-эрозионных процессов в верхней части сезонно-талого слоя.

Ключевые слова: почвенно-геокриологический комплекс, торфяные пятна, СТС, ММП.

ВВЕДЕНИЕ

Тундровые экосистемы становятся ключевыми компонентами глобального углеродного цикла [14, 19], являясь огромными резервуарами почвенного органического вещества. Запасы углерода органических соединений в почвах и торфяниках криолитозоны очень высоки, при этом консервированный в мерзлоте углерод легко минерализуется при оттаивании многолетней мерзлоты [17, 24]. Минерализация почвенной органики может привести к повышенной эмиссии парниковых газов в атмосферу. Прогнозируемое повышение температуры воздуха [15] и оттаивание слоев многолетней мерзлоты приведет к увеличению эмиссии углекислого газа (CO₂) и метана (CH₄) в атмосферу [11, 13, 24, 26]. Почвенное органическое вещество, чувствительное к климатическим изменениям, помимо запасов углерода, содержит значительные запасы органического азота (N) [21].

Торфяные мерзлотные почвы на территории европейского Северо-Востока широко распространены [5], занимая значительные площади (около 10%) на слабодренированных водораздельных террасах и озерно-аллювиальных комплексах юга Большеземельской тундры. Формирование торфяных бугров обязано процессам мерзлотного пучения при образовании ледогрунтового ядра, что приводит к поднятию определенных участков торфяных болот [12]. Поэтому торфяные горизонты бугров становятся более сухими, по сравнению с мочажинами.

Торфяные поверхности без растительного покрова приурочены преимущественно к полосе распространения плоско- и крупнобугристых многолетнемерзлых торфяников, простирающей-

ся вдоль южной окраины криолитозоны – в пределах экотона южная тундра-крайнесеверная тайга.

Генезис невегетированных пятен многолетнемерзлых торфяников в наибольшей степени изучался в тундрах Финляндии М. Сеппалой (Seppälä) [25]. Он относит их к категории абразионных формирований, генезис которых обязан поверхностной ветровой абразией. В отечественной литературе [8] упоминается термин «торфяной круг», или «кольцо торфяное» без объяснения происхождения этих образований.

При исследовании многолетнемерзлых торфяников в бассейне р. Сейда (европейский Северо-Восток России) установлено, что торфяные оголенные пятна являются источниками повышенной эмиссии N₂O в атмосферу, что является одной из причин угнетения растительности в контурах торфяных пятен [18, 21].

В естественных ландшафтах восточноевропейских тундр оголенные поверхности (котлы выдувания, или оголенные песчаные пятна) описаны на песчаных массивах, приуроченных к возвышенным элементам рельефа. Данные образования имеют эрозионное или эоловое происхождение [7]. Оголенные поверхности на суглинистых мерзлотных почвах в регионе представлены в основном пятнами-медальонами, где формируются криотурбированные тундровые почвы. Генетическим аспектам формирования минеральных криотурбированных почв посвящено значительное количество работ [9, 26 и др.], тогда как вопросы генезиса почв оголенных торфяных пятен освещены недостаточно.

В настоящей работе исследованы морфологическое строение, гидротермические и основные физико-химические свойства торфяных мерзлотных поверхностно-криогенных почв пятен, оценено влияние ландшафтных факторов на формирование оголенных торфяных пятен.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Район исследований находится в пределах Большеземельской тундры (Северо-Восток Евро-

Каверин Дмитрий Александрович, кандидат географических наук, научный сотрудник отдела почвоведения.

E-mail: dkav@mail.ru

Пастухов Александр Валериевич, кандидат географических наук, научный сотрудник того же отдела.

E-mail: alpast@mail.ru

¹ Далее «торфяные (оголенные) пятна»

пейской России), характеризуется субарктическим, умеренно-континентальным умеренно-холодным климатом. Территория относится к подзоне северной лесотундры, зоне распространения массивно-островной многолетней мерзлоты [20], представляет собой низменную холмистую равнину, перекрытую мощным слоем четвертичных отложений [5]. Среднегодовая температура воздуха (2007-2012 г.г.) составляет -4.5°C (данные температурных логгеров). Сумма положительных температур за летний период около $1100^{\circ}\text{C}/\text{дней}$, среднегодовое количество осадков 600 мм (данные метеостанции г. Воркута).

Участок исследований находится в бассейне р. Сейда, являющейся притоком р. Усы (Печорский речной бассейн). Исследования почв проведены в пределах бугристо-мочажинного комплекса, или плоскобугристого болота, ($67^{\circ}03'53''\text{с.ш.}$; $62^{\circ}55'22''\text{в.д.}$, 100 м н.у.м., в 7 км к западу от ж/д станции Сейда) площадью 0.6 км^2 , находящегося в древней озерной котловине (площадь 6.7 км^2), осложненной термокарстовыми образованиями и аллювиальными террасами. Термокарстовые озера занимают около 7% площади исследуемого комплекса. Плоские бугры занимают около 60% площади болотного массива. Форма бугров различна: от овальной до вытянутой в виде плоских гряд. Высота бугров колеблется от 1 до 3 м, размеры от 3-5 м до 20-50 м в поперечнике. Выпуклые бугры высотой более 3 м встречаются реже. Микрорельеф плоских бугров бугорковатый, бугорки высотой до 20-30 см диаметром 30-50 см.

Растительность плоскобугристого болота представлена комплексом из морошково-багульниково-мохово-лишайниковых сообществ плоских торфяных бугров и осоково-сфагновых и пушицево-осоково-моховых сообществ мочажин. Общая площадь оголенных торфяных пятен составляет около 8% от площади исследуемого бугристо-мочажинного комплекса. Площадь отдельных пятен составляет $10-500 \text{ м}^2$, диаметр пятен варьирует от 4 до 25 м [18].

В пределах участка исследований преобладают два основных типа почв: сухоторфяные мерзлотные бугров и болотные верховые торфяные мочажин. Почвы оголенных торфяных пятен не имеют своего специфического названия, однако, по морфологическому строению и свойствам наиболее близки к сухоторфяным мерзлотным почвам бугров. Исследуемые почвы пятен характеризуются сливающейся мерзлотой (сезонная многолетняя) в пределах почвенного профиля.

Торфяные мерзлотные почвы представляют собой двухкомпонентную систему «сезонно-талый слой (СТС) – многолетнемерзлые породы (ММП)». Исследование этих почв проводилось в СТС и верхнем слое ММП в виде катены «оголенное пятно – кустарничковая тундра». Полевые работы включали в себя заложение и описание почвенных траншей. При заложении траншей об-

разцы отбирались в трех точках: в центре пятна, на краю пятна и в почве под кустарничковой тундрой. При этом производился отбор проб почвенных горизонтов СТС и льдистых кернов до глубины 1.5-2.5 м в пределах верхних горизонтов ММП. Глубину СТС измеряли градуированным металлическим зондом. Классификационные названия почв определяли в соответствии с отечественными классификационными системами данных почв в регионе [1, 4, 6] и Международной реферативной базой почвенных ресурсов [16].

Влажность в поверхностных горизонтах почвы определялась весовым методом. Измерения почвенных температур проводились с помощью цифровых логгеров фирмы НОВО, установленных на глубины 0, 20, 50, 100 (120) см; рН определялся потенциометрически со стеклянным и проточным хлорсеребряным электродами; валовое содержание органического углерода и азота – на анализаторе ANA-1500, содержание водорастворимых фракций углерода – на анализаторе TOC-V CPN.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Генетические особенности формирования торфяных почв пятен. Согласно традиционным классификационным подходам, почвы плоскобугристых торфяников обозначаются как мерзлотные сухоторфяные почвы бугров [4] или тундровые мерзлотные остаточнo-торфяные почвы бугров [1]. В новой классификации почв России [6] эти почвы относятся к типу сухоторфяных отдела торфяных почв. В соответствии с Международной Реферативной базой почвенных ресурсов WRB [16] наиболее точное классификационное название – *Cryic Histosols* (т.е. торфяные почвы с глубиной СТС не более 1 м).

Вместе с тем, в отечественных и зарубежных классификациях отсутствует диагностика почв торфяных пятен, они не имеют своего отдельного классификационного названия. Поэтому, с учетом опыта собственных исследований, авторы настоящей статьи предлагают обозначать их, как **торфяные мерзлотные поверхностно-криогенные почвы пятен**.

Поверхностно-криогенные почвы торфяных пятен формируются на буграх различной высоты и выпуклости. Почвы характеризуются наличием поверхностно-криогенного горизонта мощностью до 10 см, сложенного хорошо разложившимся торфом. Последний обычно черного цвета, рыхлый, комковато-зернистой структуры. Поверхность почвы обычно неровная, «кипящая», покрыта маленькими «окатанными» бугорками, в т.ч. в форме «сталагмитов» высотой 3-5 см. В определенной мере поверхность пятен в миниатюре напоминает мелкобугорковатый микрорельеф, характерный для криогенных ландшафтов тундры. Для пятен характерно полигональное растрескивание, полигоны представлены четырех- и пятиугольниками диаметром около 1 метра.

По характеру поверхности различают несколько типов пятен. Поверхностно-криогенные выровненные и вогнутые пятна обычно формируются на относительно выположенных поверхностях торфяного плато. Выпуклые пятна с высоким центром встречаются на вершинах бугров и часто оконтурены приподнятым валиком, покрытым мохово-кустарничковой растительностью (рис.). Валики обычно образуются на нижних краях пятен-медальонов, формирующихся на склоновых поверхностях [8]. Несмотря на отсутствие сплош-

ной торфяной подушки с поверхности, пятна частично покрыты пионерной растительностью. Трещины и края пятен часто имеют тонкую черную корочку (накипные лишайники и водоросли), представляющую собой первую стадию зарастания, занимающую, как правило, большую часть пятна. На второй стадии зарастания, обычно характерной для периферийных частей пятна, появляются лишайники, на третьей – политриховые мхи, на четвертой формируется мохово-лишайниково-кустарничковая растительность.

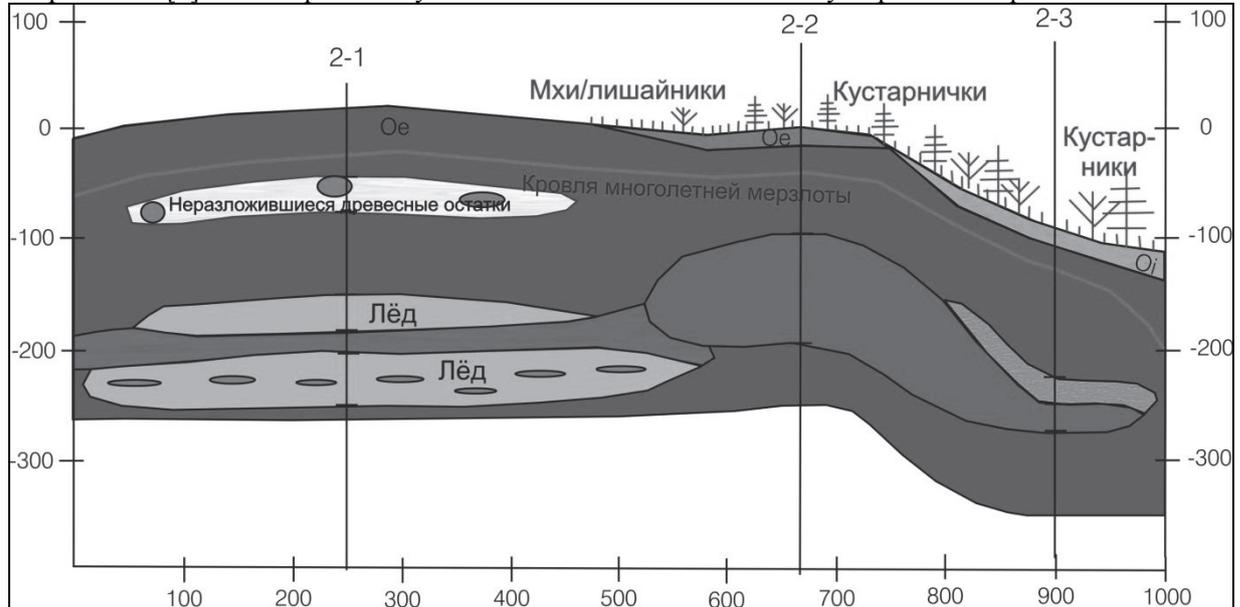


Рис. 1. Морфологическое строение почвенно-геокриологического комплекса, поверхностно-криогенное пятно с высоким центром (траншея № 2, 2011 г.)

Одним из основных факторов образования поверхностного криогенного горизонта является сезонная активизация поверхностных криогенных процессов. Прежде всего, здесь выражено неравномерное поверхностное пучение (вспучивание), происходящее при промерзании верхней части СТС. Очевидно, что хорошо разложившаяся торфяная масса по своим свойствам близка к пучнистым гидрофильным увлажненным грунтам, которые при переходе в мерзлое состояние расширяются в объеме. В результате замерзания воды и сегрегации льда происходит вспучивание, что приводит к разрушению грубогумусового поверхностного горизонта и растительного покрова [8]. При замерзании почвы в пустотах и трещинах рыхлого поверхностного горизонта обильно формируются кристаллы и друзы стебелькового льда. Основная поверхность почвы под снегом в зимнее время часто покрывается ледяной коркой (тонкой наледью) мощностью около 1 см, которая обжимает маленькие торфяные бугорки. Подобная ледяная корка не формируется на так называемых «целинных» почвах под мохово-кустарничковой растительностью торфяников.

Был проведен полевой опыт по определению поверхностного пучения. Выявлено, что вспучивание почвы приводит к затягиванию следов на

поверхности пятен за 1-2 года, т.е. пятна могут частично «регенерировать» свою поверхность. Для определения процессов поверхностного пучения в сентябре 2011 г. на одном из пятен на площади 1 м² были установлены 30 вертикально стоящих спичек, вдавленных наполовину их длины. На поверхности были сделаны 3 глубоких прямоугольных отпечатка площадью 15*40 см глубиной 2 см, и была вбита на 20 см в поверхность почвы деревянная доска (15*40*2 см). В июле 2012 г. обнаружено, что 16 из 30 спичек оказались выдавленными полностью или частично. Прямоугольные отпечатки полностью не затянулись, но сгладились, дно их стало неровное. Доску выдавило на 10 см и наклонило на 15 градусов.

Криогенное строение срединных и нижних горизонтов деятельного слоя торфяных пятен сходно с таковым почв кустарничковой тундры. В сезонно-мерзлом слое (СМС) встречаются преимущественно слоистые, массивные и порфирированные криогенные текстуры. В пределах СМС количество ледяных включений и, соответственно, льдистость уменьшается вниз по профилю. В ММП льдистость с глубиной постепенно увеличивается, массивные криотекстуры сменяются атакситовыми, сетчатыми, слоистыми. Горизонты

ММП выпуклых бугров на глубине 1.5-2 м и ниже характеризуются очень высокой льдистостью, формируя ледогрунтовое ядро (рис. 1).

Одним из проблемных моментов является целесообразность применения термина «криотурбация» для характеристики поверхностного горизонта исследуемых почв. Согласно определению термина, «криотурбации» – это текстурные формы сложения дисперсных горных пород, при которых слои в разрезе напоминают завихрения, загибы, кольца и т. п. виды рисунков. Возникают под воздействием динамических деформаций, вызванных морозом в избыточно увлажненных дисперсных слоях почвы [3]. В поверхностном горизонте исследуемых почв пятен нет так называемого «рисунка криотурбаций», отсутствуют следы прорыва на поверхность массы нижележащих горизонтов, как в случае образования «морозных котлов», т.е. пятен-медальонов, часто встречаемых в минеральных почвах. Торфяные горизонты СТС глубже 10 см, как и подстилающие ММП, характеризуются слоистым сложением и отсутствием криотурбационных нарушений.

Наши наблюдения подтверждают выводы финских ученых [18, 25] о возможной ветровой абразии поверхностных горизонтов на наветренных склонах высоких торфяных бугров (пальз). Термин «абразия» в геокриологической литературе [8] в большей степени применяется для обозначения механического разрушения и сноса горных пород в береговой зоне водоёмов. В данном случае Сеппала (Seppälä) [25] говорит о снеговой корразии и/или эксфолиации торфа в зимнее время, обусловленной ветром. Для облегчения понимания термин «ветровая абразия» можно заменить термином «ветровая эрозия», воздействие которой на почво-грунты характерно для всех сезонов года. Эрозия почв – это вынос рыхлого материала с их поверхности, которая может происходить под действием ветра.

В подтверждение фактора действия ветровой эрозии в прошлом и/или настоящем отметим, что на наиболее высоких выпученных торфяных буграх пятна формируются на наветренных склонах южной экспозиции. Данные метеостанций Воркутинского района Республики Коми (Воркута, Хановой, Сивая Маска и др.) показывают преобладание ветров юго-западного и южного направления в зимние месяцы (октябрь-апрель) при скорости 20-40 м/с [2]. Сильные ветры зимой способствуют выдуванию снежного покрова с этих склонов, что приводит к значительному охлаждению почв, наряду с ветровой эрозией это способствует деградации мохово-кустарничковой растительности. Ветровая эрозия в наибольшей степени проявляется в начале и конце зимнего периода (октябрь, ноябрь, март, апрель), когда поверхность замерзшей почвы покрыта маломощным снеговым покровом, либо он отсутствует.

Что касается торфяных пятен на относительно

низких буграх, фактор ветровой эрозии здесь мог работать в начальные периоды их формирования. Однако, учитывая, что в настоящее время мощность снега здесь значительная (30-40 см), зимняя ветровая эрозия не оказывает существенного влияния на развитие этих пятен. Одним из объяснений является то, что низкие торфяные бугры с пятнами могут представлять результат коллапса выпуклых торфяных бугров [18].

Сеппала (Seppälä) [25] отмечает, что ветер и в течение вегетационного периода также может способствовать эрозии пятен, высушивая поверхность почвы и выдувая мельчайшие торфяные частицы. Наши наблюдения подтверждают эти факты. В теплый период преобладают ветра северного направления со средней скоростью не более 20 м/с [2]. Тем не менее, существенного вклада в формирование пятен эти процессы не вносят, являясь лишь сопутствующими.

Гидротермические свойства торфяных почв. Кровля ММП в определенной мере повторяет неровности рельефа. СТС в почвах пятен достигает 40-70 см, что относительно глубже, чем в торфяных мерзлотных почвах под кустарничковой тундрой – 30-60 см. Это связано с пониженным альбедо темной поверхности пятен и их повышенной влажностью. Исследования летнего гидротермического режима торфяных почв пятен и кустарничковой тундры, проведенные учеными Университета Восточной Финляндии, показали относительно высокую температуру и влажность в пятнах [18]. По данным Сеппала (Seppälä) [25] в торфяниках субарктической Финляндии сезонная протайка, наоборот, глубже на вегетированных поверхностях, в связи с большей сухостью и, соответственно, меньшей теплопроводностью почв оголенных торфяных пятен.

Таблица 1. Среднегодовые температуры в СТС и ММП низкого торфяного бугра

Гидрологический год/глубина	0 см	10 см	20 см	50 см	80 см	120 см
2007-2008	0.5	-0.1	-0.7	-1.0	-1.0	-1.0
2008-2009	-0.7	-0.8	-1.3	-1.5	-1.4	-1.3
2009-2010	-1.6	-1.4	-1.8	-2.0		
2010-2011	-1.2	-1.3	-1.7	-1.9		

Многолетнемерзлые горизонты отмечены курсивом

Средняя глубина СТС в торфяниках определяется и мощностью снежного покрова зимой. К примеру, в 2011 году относительно низкие торфяные бугры в юго-западной части болотного комплекса характеризовались средней глубиной СТС 52 см при мощности снега 30 см. Сезонная протайка на участке с высокими буграми в северной части болота составила 43 см при средней мощности снежного покрова 19 см. Более мощный снежный покров низких бугров обуславливает относительно теплый зимний режим формирующихся здесь торфяных почв (табл. 1). Средне-

годовые температуры варьируют в диапазоне -0 - 2 С.

Почвы пятен на относительно высоких буграх с меньшей мощностью снега характеризуются более суровым температурным режимом (табл. 2). В годы с холодными зимами все горизонты СТС и ММП характеризуются среднегодовой температурой ниже -4 С.

Таблица 2. Среднегодовые температуры в СТС и ММП высокого торфяного бугра

Гидрологический год/глубина	0 см	20 см	50 см	80 см	120 см
2007-2008	-1.8	-2.3	-2.7	-2.5	-2.3
2008-2009	-2.9	-3.1	-3.4	-3.1	-2.9
2009-2010	-4.6	-4.4	-4.6	-4.4	-4.1
2010-2011	-2.0	-2.2	-2.8	-2.6	-2.7

Многолетнемерзлые горизонты отмечены курсивом

Охлаждению почв в зимний период способствует высокая льдистость торфяных горизонтов, которые при низких отрицательных температурах обладают повышенной теплопроводностью.

В зимнее время содержание влаги (льдистость) возрастает на фоне высокого уровня осадков и резкого снижения испарения в предзимний период. Содержание весовой влаги в многолетнемерзлых горизонтах превышает таковое СТС в 3-6 раз. Особенно высокая льдистость отмечается в ледогрунтовых слоях, слагающих высокие торфяные бугры, часто имеющие пятна на поверхности. Среднегодовые температуры мерзлоты на глубине нулевых колебаний мерзлоты составляют -1 - 2 С.

Физико-химические свойства. Кислотность почвенно-геокриологического комплекса (почва пятна и подстилающие ММП) увеличивается вниз по профилю (Табл. 3). Горизонты СТС характеризуются средними значениями $pH_{KCl} = 3.5$, многолетнемерзлые горизонты - 4.1. В торфяных пятнах кислотность значительно ниже, чем в торфе кустарниковой тундры, что связано с большей степенью разложения торфа в контуре пятна.

Таблица 3. Физико-химические свойства в СТС и ММП торфяных бугров

Почва	Слой	Глубина, см	pH водн	pH KCl	C, %	N, %	C/N
Траншея № 1							
Поверхностно-криогенная почва пятна	СТС	0-30	<u>4.5</u> 4.5 - 4.5	<u>3.7</u> 3.6 - 3.7	<u>46.3</u> 45.9 - 46.6	<u>2.2</u> 2.2 - 2.2	<u>21</u> 21 - 21
	ММП	30-149	<u>5.2</u> 4.9 - 5.3	<u>4.3</u> 4.0 - 4.5	<u>45.9</u> 43.8 - 47.8	<u>2.0</u> 1.7 - 2.5	<u>23</u> 19 - 27
Торфяная почва краевой зоны пятна	СТС	0-30	<u>4.2</u> 4.2 - 4.3	<u>3.3</u> 3.3 - 3.3	<u>45.9</u> 45.5 - 46.3	<u>2.4</u> 2.4 - 2.4	<u>19</u> 19 - 19
	ММП	30-150	<u>4.8</u> 4.3 - 5.0	<u>3.9</u> 3.6 - 4.0	<u>47.3</u> 46.3 - 49.5	<u>2.6</u> 2.1 - 2.9	<u>19</u> 16 - 24
Торфяная почва под кустарниковой тундрой	СТС	0-30	<u>3.7</u> 3.6 - 3.8	<u>2.9</u> 2.8 - 2.9	<u>47.8</u> 47.4 - 48.1	<u>1.5</u> 1.2 - 1.9	<u>33</u> 25 - 40
	ММП	30-140	<u>4.6</u> 3.9 - 4.9	<u>3.7</u> 3.2 - 3.9	<u>47.6</u> 46.9 - 48.3	<u>2.6</u> 2.2 - 2.7	<u>19</u> 17 - 21
Траншея № 2							
Поверхностно-криогенная почва пятна	СТС	0-30	<u>4.7</u> 4.4 - 5.0	<u>4.0</u> 3.6 - 4.3	<u>47.3</u> 46.7 - 47.6	<u>2.6</u> 2.4 - 2.8	<u>18</u> 17 - 19
	ММП	30-257	<u>5.3</u> 5.1 - 5.5	<u>4.4</u> 4.3 - 4.6	<u>46.8</u> 28.4 - 50.9	<u>2.1</u> 1.3 - 2.4	<u>23</u> 19 - 38
Торфяная почва краевой зоны пятна	СТС	0-30	<u>4.4</u> 4.3 - 4.6	<u>3.5</u> 3.2 - 3.8	<u>46.6</u> 45.5 - 47.6	<u>2.8</u> 2.6 - 3.1	<u>17</u> 15 - 18
	ММП	30-258	<u>5.0</u> 4.8 - 5.3	<u>4.1</u> 4.0 - 4.4	<u>48.5</u> 47.0 - 49.3	<u>2.4</u> 2.0 - 2.9	<u>21</u> 16 - 24
Торфяная почва под кустарниковой тундрой	СТС	0-30	<u>4.2</u> 3.9 - 4.6	<u>3.3</u> 3.1 - 3.7	<u>43.8</u> 35.4 - 48.4	<u>2.1</u> 1.9 - 2.4	<u>21</u> 18 - 25
	ММП	30-257	<u>5.0</u> 4.6 - 5.8	<u>4.0</u> 3.1 - 5.0	<u>48.3</u> 46.1 - 49.0	<u>2.4</u> 2.1 - 2.9	<u>20</u> 16 - 23

Содержание углерода органических соединений в исследуемых почвах и подстилающих ММП варьирует в среднем от 35 до 50%, за исключением значения 28.4% в ММП поверхностно-криогенной почвы в траншее № 2, где на глубине 200-210 см в торфе присутствуют слабо разложившиеся остатки стволов ели. При этом существенных различий между торфяными почвами пятен и вегетированной поверхности бугров не выявлено. Содержание азота находится в диа-

пазоне 1.2-2.9%, среднее значение - 2.3%, при этом средние по профилю максимальные концентрации выявлены в почвах краевой зоны - 2.5%, минимальные в почвах пятен - 2.1% (табл. 3).

Различия в проанализированных скважинах четко проявляются при оценке профильного изменения величины C/N, характеризующей степень разложения торфа и его обогащенности азотом. В сравнении с ММП, в горизонтах деятельного слоя соотношение C/N ниже, соответ-

венно степень разложенности торфа выше, за исключением почвы кустарничковой тундры, характеризующейся повышенным C/N. В условиях тундры и лесотундры вся микробиологическая активность сосредоточена в самых верхних горизонтах (преимущественно 0-10 см). При этом здесь наблюдается вариативность в распределении данного отношения. Степень обогащения азотом торфяных горизонтов снижается от центра пятна к кустарничковой тундре.

На примере траншеи № 2 четко выделяется толща «нижних» многолетнемерзлых торфяных горизонтов (глубина 80-257 см), соотношение C/N здесь варьирует в узком диапазоне 20-25% и слабо отличается между разрезами. Учитывая локальный характер исследований, это связано с идентичными палеогеографическими условиями при формировании торфа. Относительно однородная толща нижних горизонтов «законсервирована» в многолетней мерзлоте, которая не оттаивала здесь в течение последних 1-2 тысяч лет. Значительные вариации C/N в самом верхнем многолетнемерзлом горизонте (глубины 40-80 см), наоборот, могут быть связаны с различием палеогеографических условий торфонакопления на фоне его периодической оттайки в субатлантическом периоде. В почве пятна на глубине 70-80 см соотношение C/N увеличивается до 37-38, здесь локализован ледогрунтовой горизонт с древесными остатками.

Запасы общего углерода и азота (кг/м²) были рассчитаны для глубин 0-30 см, 0-150 см, а также на максимальные глубины ручного бурения (257 см). Запасы углерода в поверхностных горизонтах деятельного слоя (0-30 см) исследуемых почв пятен сопоставимы со значениями запасов углерода сухоторфяных мерзлотных почв бугров бассейна Сейды 21.2±12.5 кг/м² [14], однако, находятся в верхней части данного диапазона вариации (табл. 4). Запасы углерода и азота между двумя траншеями схожи, различия наблюдаются между скважинами в траншеях. Невысокие запасы данных элементов в «целинной» почве обусловлены присутствием здесь поверхностного грубогумусового горизонта. Повышенное содержание C и N в верхних горизонтах пятна связано с их большей плотностью и составом (средне- и хорошо разложившийся торф).

Согласно современным исследованиям, считается, что органическое вещество СТС и ММП отличается по составу и возрасту, а следовательно, имеет различную скорость минерализации и чувствительность к изменениям температуры [22]. Повышенная «температурная» чувствительность органического вещества в ММП при его оттаивании может способствовать значительной эмиссии парниковых газов в наземных экосистемах. Выраженность сезонных циклов промерзания-протаивания является одним из ключевых факторов, влияющих на степень устойчивости органического вещества в почве [23].

Таблица 4. Запасы углерода и азота органических соединений в СТС и ММП торфяных бугров

Почва	Слой	Глубина, см	запасы С, кг/м ²		запасы N, кг/м ²	
			Траншея 1	Траншея 2	Траншея 1	Траншея 2
Поверхностно-криогенная почва пятна	СТС	0-30	28.2	28.2	1.3	1.5
	ММП	30-150	46.5	51.7	2.0	2.3
		30-257	не опр.	84.3	не опр.	3.7
		0-150	74.8	80.0	3.4	3.8
		0-257	-	112.5	-	5.3
Торфяная почва краевой зоны пятна	СТС	0-30	34.0	33.3	1.8	1.9
	ММП	30-150	90.3	93.1	4.9	5.2
		30-258	-	131.2	-	7.8
		0-150	124.3	145.9	6.7	7.2
		0-257	-	179.1	-	9.6
Торфяная почва под кустарничковой тундрой	СТС	0-25	5.7	5.8	0.2	0.3
	ММП	25-150	94.8	96.6	5.2	5.4
		25-257	-	151.4	-	8.0
		0-150	100.6	102.4	5.4	5.7
		0-257	-	157.2	-	8.3

Проведенные аналитические исследования подтвердили неоднородность состава и свойств органического вещества торфяных горизонтов, как в разрезе «СТС-ММП», так и катене «пятно – тундра». По абсолютному содержанию водорастворимых компонентов многолетнемерзлые горизонты (с глубины 30-40 см и ниже) во всех разрезах характеризуются схожими концентрациями

углерода водорастворимых органических соединений (C_{ВОВ}), извлекаемых водой при комнатной температуре (0.09-0.24% от массы почвы). Дополнительная обработка горячей водой позволяет в 3-5 раза увеличить выход углерода водорастворимых органических соединений из образцов торфа многолетнемерзлой толщи (выход C_{ВОВ} 0.20-0.83%) (табл. 5).

Таблица 5. Среднее содержание углерода водорастворимых органических соединений в СТС и ММП торфяных бугров

Почва	Слой	Глубина, см	после обработки холодной водой		дополнительная обработка горячей водой	
			C, %	S	C, %	S
Поверхностно-криогенная почва пятна	СТС	0-30	0.15	0.06	0.69	0.33
	ММП	30-250	0.13	0.04	0.37	0.06
Торфяная почва краевой зоны пятна	СТС	0-30	0.30	0.15	2.03	0.54
	ММП	30-250	0.17	0.04	0.44	0.14
Торфяная почва под кустарничковой тундрой	СТС	0-30	0.45	0.03	1.54	0.54
	ММП	30-250	0.19	0.04	0.67	0.30

При оценке относительного содержания углерода водорастворимых органических соединений – в долях от общего содержания почвенного углерода, видно, что в верхней части торфяника активно протекают процессы минерализации торфа, с высвобождением легкоминерализуемых (извлекаемых горячей водой) фракций, поддерживающих микробиологическую деятельность, рост и развитие растений. Доля легкоминерализуемых органических соединений в почвах пятен существенно меньше, что объясняется отсутствием здесь растительности, т. к. именно легкоминерализуемые фракции обеспечивают растения азотом и питательными элементами в течение вегетационного периода [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Почвенный покров плоскобугристых торфяников достаточно неоднороден, наряду с сухоторфяными почвами бугров, на их поверхности формируются торфяные мерзлотные поверхностно-криогенные почвы пятен. Формирование и существование оголенных торфяных пятен на буграх обусловлено активизацией криогенных (вспучивание, растрескивание) и поверхностно-эрозионных (снеговая коррозия, ветровая эрозия) процессов в верхней части СТС. При этом влияние эрозионных процессов в большей степени имеет место на начальных этапах формирования пятен.

По гидротермическому режиму торфяные почвы оголенных пятен и бугров различаются преимущественно в летний период, что приводит к некоторой дифференциации геофизиологических условий в плоскобугристых торфяниках. Учитывая современные прогнозы потепления климата, существование таких оголенных поверхностей может способствовать ускоренной деградации многолетней мерзлоты в торфяниках, широко распространенных на южном пределе криолитозоны.

Почвы пятен несколько отличаются от сухоторфяных почв под кустарничковой растительностью по основным физико-химическим свойствам.

Поверхностно-криогенные почвы пятен характеризуются более высокой степенью разложившимся органического вещества и, соответственно, высокими запасами углерода и в СТС. Отсутствие растительного покрова на торфяных пятнах согласуется с низким содержанием в почве легкоминерализуемых органических соединений, обеспечивающих растения азотом и питательными элементами.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы сердечно благодарят вед. инж. Т.В. Зонову за выполнение аналитических работ по определению свойств органического вещества и к.б.н. Е.М. Лаптеву за помощь в интерпретации результатов.

Работа выполнена при поддержке проекта Университета Восточной Финляндии - СгуоN «Механизмы, лежащие в основе выбросов N₂O с поверхности торфа в тундре, подверженной процессам криотурбациям»; гранта РФФИ 12-04-31759-мол-а; программы Президиума РАН - №12-Е-4-1004 «Формирование и функционирование почв криолитозоны европейского Северо-Востока в условиях изменения климата и антропогенных воздействий».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас почв Республики Коми / Рос. акад. наук, Урал. отд-ние, Коми науч. центр, Ин-т биологии; отв. ред. : Г.В. Добровольский, А.И. Таскаев, И.В. Забоева. – Сыктывкар : [б. и.], 2010. 355 с.: ил. + 7 карт.
2. Атлас Республики Коми по климату и гидрологии / Департамент по охране окружающей среды М-ва природ. ресурсов и охраны окружающей среды Республики Коми, Ин-т биологии Коми науч. центра Уральского отделения РАН . М., Дрофа, 1997. 116 с. : ил., карт.
3. Геологический словарь / Под ред. Власова Л.В., Стариковой Л.М. Т.1. М., Недра, 1973. 486 с.
4. Забоева И.В. Почвы и земельные ресурсы Коми АССР. Сыктывкар. 1975. 344 с.
5. Каверин Д.А., Шахтарова О.В., Пастухов А.В., Мажитова Г.Г., Лаптева Е.М.. Составление крупномасштабных почвенных карт на примере ключевых участков в тундре и лесотундре европейского северо-востока // География и природные ресурсы. 2012. № 3. С. 140-146.
6. Классификация и диагностика почв России / Составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск, Ойкумена. 2004. 342 с.

7. Кулюгина Е.Е. Флора и растительность песчаных обнажений Припечорских тундр / Автореф. дис. на соиск. учен. степ. к.б.н.: Спец. 03.00.05. Сыктывкар, 2004. 26 с.
8. Мудров Ю.В. Мерзлотные явления в криолитозоне равнин и гор. Основные понятия и определения / Иллюстрированный энциклопедический справочник. М., Научный мир. 2007. 316 с.
9. Пастухов А.В., Каверин Д.А. Распределение углерода органических соединений торфяников на Северо-Востоке европейской России // Актуальные проблемы биологии и экологии: Матер. докл. XIX Всерос. конф. (Сыктывкар, 2-6 апреля 2012 г.). – Сыктывкар, 2012. – С. 167-169.
10. Bockheim J.G., Tarnocai C. Recognition of cryoturbation for classifying permafrost-affected soils // *Geoderma*. 1998. Vol. 81. P. 281–293.
11. Christensen T.R., Johansson T., Akerman H.J., Mastepanov M., Malmer N., Friborg T., Crill P., Svensson B.H. Thawing subarctic permafrost: Effects on vegetation and methane emissions // *Geophys. Res. Lett.* 2004. Vol. 31, L04501, doi:10.1029/2003GL018680.
12. French H.M. The periglacial environment / Third Edition. John Wiley and Sons Ltd, Chichester, UK. 2007. 458 p.
13. Hollesen J., Elberling B., Jansson P.E. Future active layer dynamics and carbon dioxide production from thawing permafrost layers in Northeast Greenland // *Glob. Change Biol.* 2011. Vol. 17. P. 911–926, doi:10.1111/j.1365-2486.2010.02256.x.
14. Hugelius G., Virtanen T., Kaverin D., Pastukhov A., Rivkin F., Marchenko S., Romanovsky V. and Kuhry P. High-resolution mapping of ecosystem carbon storage and potential effects of permafrost thaw in periglacial terrain, European Russian Arctic // *J. Geophys. Res.* 2011. Vol. 116. G03024, doi:10.1029/2010JG001606.
15. IPCC, Climate Change 2007: The Physical Science Basis / Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2007. 996 p.
16. IUSS Working Group WRB. World reference base for soil resources // 2nd edition. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome. 2006. 145 p.
17. Kuhry P., Mazhitova G.G., Forest P.-A., Deneva S.V., Virtanen T. and Kultti S. Upscaling soil organic carbon estimates for the Usa Basin (Northeast European Russia) using GIS-based land-cover and soil classification schemes // *Danish Journal of Geography*. 2002. Vol. 102. P. 11-25.
18. Marushchak M.E., Pitkamaki A., Koponen H., Biasi C., Seppälä M. and Martikainen P.J. Hot spots for nitrous oxide emissions found in different types of permafrost peatlands // *Global Change Biology*. 2011. Vol. 17. P. 2601–2614, doi: 10.1111/j.1365-2486.2011.02442.x
19. McGuire A.D., Anderson L.G., Christensen T.R., Dallimore S., Guo L., Hayes D.J., Heimann M., Lorenson T.D., Macdonald R.W., Roulet N. Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change // *Ecological Monographs*. 2009. Vol. 79. P. 523-555.
20. Oberman N.G., Mazhitova G.G. Permafrost mapping of North-east European Russia based on period of the climatic warming of 1970–1995 // *Norsk Geografisk Tidsskrift – Norwegian J. Geography*. 2003. Vol. 57. No. 2. P. 111–120.
21. Repo M.E., Susiluoto S., Lind S.E., Jokinen S., Elsakov V., Biasi C., Virtanen T. and Martikainen P.J. Large N₂O emissions from cryoturbated peat soil in tundra // *Nature Geoscience*. 2009. Vol. 2. P. 189-192.
22. Rodionov A., Flessa H., Kazansky O., Guggenberger G. Organic matter composition and potential trace gas production of permafrost soils in the forest tundra in northern Siberia // *Geoderma*. 2006. Vol. 135. P. 49-62.
23. Schmidt M., Margaret S. Torn, Abiven S., Dittmar T., Guggenberger G., Janssens I., Kleber M., Kögel-Knabner I., Lehmann J., Manning D., Nannipieri P., Rasse D., Weiner S., Trumbore S. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property // *Nature*. 2011. Vol. 478. P. 49-56. doi:10.1038/nature10386.
24. Schuur E.A.G., Bockheim J., Canadell J.G., Euskirchen E., Field C.B., Goryachkin S.V., Hagemann S., Kuhry P., Laflaur P.M., Lee H., Mazhitova G., Nelson F.E., Rinke A., Romanovsky V.E., Shiklomanov N., Tarnocai C., Venevsky S., Vogel J.G., Zimov S.A. Vulnerability of Permafrost Carbon to Climate Change: Implications for the Global Carbon Cycle // *BioScience*. 2008. Vol. 58(8). P. 701-714. doi:10.1641/B580807.
25. Seppälä M. Surface abrasion of palsas by wind action in Finnish Lapland // *Geomorphology*. 2003. Vol. 52. P. 141-148.
26. Walker D.A., Epstein H.E., Romanovsky V.E., Ping C.L., Michaelson G.J., Daanen R.P., Shur Y., Peterson R.A., Krantz W.B., Reynolds M.K., Gould W.A., Gonzalez G., Nicolsky D.J., Vonlanthen C.M., Kade A.N., Kuss P., Kelley A.M., Munger C.A., Tamocai C.T., Matveyeva N.V., Daniels F.J.A. Arctic patterned-ground ecosystems: A synthesis of field studies and models along a North American Arctic Transect // *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113, doi: 10.1029/2007JG000504.

GENETIC CHARACTERISTICS OF PERMAFROST-AFFECTED SOILS FORMED IN BARE CIRCLES OF PEAT PLATEAUS IN BOLSHEZEMELSKYA TUNDRA

© 2013 D.A. Kaverin, A.V. Pastukhov

Institute of Biology Komi SC RAS, Syktывkar

Genetic features of tundra permafrost-affected soils developed in the contours of bare peat circles have been investigated. The study was conducted in a peat plateau located in Russian European North-East. Morphological structure, hydrothermal and basic physico-chemical properties in the peat surface-cryogenic permafrost-affected soils were under study. The characteristic of the studied soils have been given according to the two-component system "active layer-permafrost" along the catena «peat circle - shrub tundra». The impact of landscape factors on peat circle formation was accessed. Peat circle formation is shown to be affected by activation of cryogenic processes and surface erosion in the top of active layer.

Key words: soil-geocryological complex, peat circles, active layer, permafrost.

Dmitry Kaverin, Candidate of Geography, researcher of soil department. E-mail: dkav@mail.ru

Alexander Pastukhov, Candidate of Geography, researcher of soil department. E-mail: alpast@mail.ru