

УДК 631.412:631.435:551.34 (234.851)

doi: 10.17223/19988591/48/2

В.В. Старцев, Ю.А. Дубровский, Е.В. Жангуров, А.А. Дымов

Институт биологии Коми научного центра УрО РАН, г. Сыктывкар, респ. Коми, Россия

Пространственная неоднородность свойств почв в зоне распространения островной мерзлоты (Приполярный Урал)

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта РФФИ № 18-34-00618 «Особенности органического вещества почв Приполярного Урала» и комплексной программы фундаментальных научных исследований УрО РАН № 18-4-4-14 «Разнообразие основных компонентов экосистем в широтном и высотном градиентах западного макросклона Северного и Приполярного Урала».

Пространственная неоднородность свойств почв определяется различными почвенными комбинациями в пределах элементарных почвенных ареалов (ЭПА). Рассмотрены морфологические и физико-химические свойства почв горно-лесного и горно-тундрового поясов Приполярного Урала на примере двух траншей. Почвы горно-лесного пояса формируются в спорадически-пятнистом ЭПА, а почвы горно-тундрового пояса – в регулярно-циклическом ЭПА. Выявлено, что высокая гетерогенность напочвенного растительного покрова обуславливает специфичность формирования различных почвенных комбинаций, различающихся генетически и морфологически. В горно-лесном поясе формируются торфяно-перегнойно-криометаморфическая почва (Histic Cambi-Turbic Cryosol (Humic)), торфяно-криозём глеевый криогенно-ожелезнённый (Histic Cryosol (Turbic, Reductaquic)) и торфяно-криозём криогенно-ожелезнённый (Histic Cryosol). В горно-тундровом поясе формируются подбур глеевый глинисто-иллювирированный мерзлотный (Stagnic Entic Podzol (Skeletal, Turbic, Reductaquic)), подбур иллювиально-гумусовый глееватый мерзлотный (Folic Cryosol (Skeletal, Humic)) и подбур глинисто-иллювирированный (Stagnic Entic Podzol (Turbic, Skeletal)). По физико-химическим показателям выявлено, что увеличение содержания обменных катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} в органогенных горизонтах исследуемых почв определяется составом мохово-лишайникового яруса и сменой доминантов напочвенного покрова, которые маркируют различные условия увлажнения экосистемы. Содержание углерода и азота в минеральных горизонтах почв горно-тундрового пояса значительно выше, чем в почвах горно-лесного пояса, что обусловлено низкой биологической активностью почв горно-тундрового пояса из-за суровых климатических условий и большей консервацией органического вещества в минеральных горизонтах.

Ключевые слова: мерзлотные почвы; неоднородность свойств; многолетнемёрзлые породы ММП; Cryosol; Podzol.

Введение

Пространственное варьирование морфологических, физико-химических и физических свойств почв определяется различными природными факто-

рами, изучение которых может привести к более глубокому пониманию почвы как природного тела и процесса почвообразования в целом. Структура почвенного покрова (СПП) той или иной территории характеризуется специфическими особенностями, и без ее изучения исследования не могут быть полноценными [1, 2].

Современному изучению различных аспектов почвенного покрова северных регионов, в том числе горных территорий, уделяется огромное внимание [3–6]. Территория Приполярного Урала относится к южному пределу распространения криолитозоны на европейском северо-востоке России, для которого характерна островная и редкоостровная мерзлота [7]. Влияние криогенных процессов проявляется в виде формирования льдистой мерзлоты, специфической структурной организации почвенных горизонтов, образования или разрушения почвенной структуры [8]. Структура почвенного покрова района исследования характеризуется значительной пестротой, обусловленной сочетанием контрастных экологических условий и широким рядом факторов: мозаичностью растительного покрова, характером почвообразующих пород и рельефа (крутизна и экспозиция склонов), наличием высотных растительных поясов и влияния криогенеза [9, 10]. Важность изучения горных экосистем подчеркивается их значимостью в поддержании биосферных функций и сохранении глобального биоразнообразия [11]. Отмечается важная роль почвенного покрова в формировании разнообразия наземных экосистем [12]. Исследования пространственного варьирования свойств почв позволят получить более достоверную информацию об особенностях почвенного покрова Приполярного Урала.

В связи с этим цель данного исследования – изучение пространственной неоднородности свойств почв Приполярного Урала.

Материалы и методики исследования

Исследования проведены на территории национального парка «Югыд ва» (рис. 1). Согласно почвенно-географическому районированию территория исследования относится к округу Приполярного Урала горно-тундровых и горно-лесных глееподзолистых потёчно-гумусовых почв [13]. Почвообразующими породами служат элювий и элюво-делювий, которые представлены преимущественно метаморфическими сланцами и кварцито-песчаниками [14, 15]. Характерной чертой склонов Приполярного Урала является формирование крупноглыбовых образований – курумов, солифлюкционных террас, что типично для склонов с ледниковыми и с элювиальными и делювиальными образованиями. Согласно [16] почвы региона относятся к очень холодному подтипу длительно сезоннопромерзающего типа. Климат Приполярного Урала резко континентальный, суровый, с длительной морозной зимой и коротким прохладным летом. Среднегодовая температура воздуха равна $-3,2^{\circ}\text{C}$, абсолютная минимальная температура -55°C (январь)

и максимальная $+30^{\circ}\text{C}$ (июль) [17]. По проведенным ранее исследованиям [18] среднегодовая температура воздуха на высотах от 400 до 610 м изменялась от $-1,5$ до $-2,2^{\circ}\text{C}$, а появление устойчивых отрицательных температур воздуха происходит во второй половине октября. Глубина деятельного (сезонно-талого) слоя почв на период исследований (с 24 июля по 04 августа 2013 г.) составляла от 0,4 до 1 м.

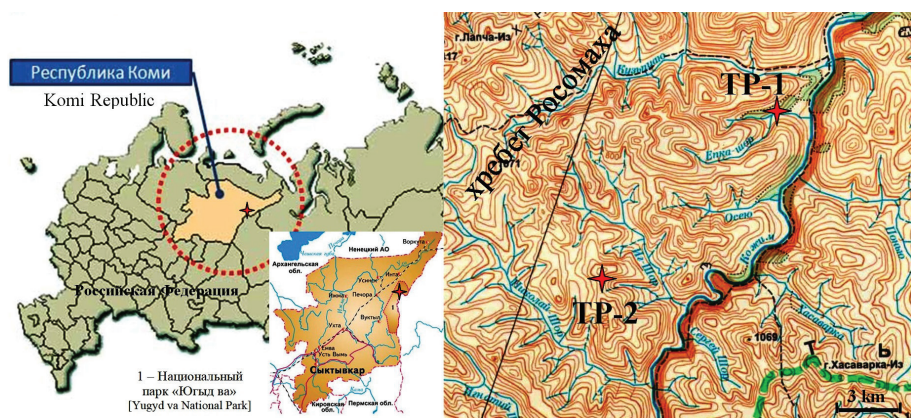


Рис. 1. Расположение объектов исследования. Обозначения: TP-1 – траншея в горно-лесном поясе; TP-2 – траншея в горно-тундровом поясе (фрагмент туристской карты масштаба 1:200 000, Приполярный Урал, национальный парк «Югыд ва»)

[Fig. 1. Location of research objects. Designations: TP-1 - Trench in the mountain-forest belt, TP-2 - Trench in the alpine tundra belt]

Для определения неоднородности морфологических и физико-химических свойств мерзлотных почв использовали траншейный метод. Данный метод позволяет выявить особенности изменения свойств почв в пределах нескольких метров [19]. Траншея горно-лесного пояса (рис. 2, А) заложена в ельнике ерничково-зеленомошном на высоте 430 м над ур. м., длина траншеи составляет 3,8 м. Координаты расположения: $65^{\circ}08'12.5''\text{N}$, $60^{\circ}51'24.0''\text{E}$. Траншея горно-тундрового пояса (рис. 2, В) заложена перпендикулярно пологому склону северо-западной экспозиции хребта Росомаха (высота 961 м над ур. м.) протяженностью 4,1 м. Координаты расположения: $65^{\circ}02'06.3''\text{N}$, $60^{\circ}35'19.2''\text{E}$.

Для тундр и лесов северных регионов характерна мозаичность растительного покрова, обусловленная быстрой сменой в пространстве экологических условий, протекающими в почве криогенными процессами, микро-рельефом, пестротой микроклиматических условий [20]. Кроме этого, при закладке траншей выполнены многочисленные прикопки для определения типа элементарного почвенного ареала (ЭПА) исследуемой территории. Растительный покров описан с использованием стандартных геоботанических методов [21]. Траншеи разделены на три сегмента по смене доминан-

тов в напочвенном растительном покрове. Основная роль отведена описанию таких характеристик, как состав, общее проективное покрытие (ОПП) травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов и проективное покрытие отдельных сегментов. В травяно-кустарничковом покрове описана вертикальная и горизонтальная структура, учитывали видовой состав и ОПП. Проективное покрытие каждого вида оценивали в составе яруса непосредственно на всей пробной площади. При описании напочвенного покрова регистрировали видовой состав, ОПП и степень господства видов. Сегменты траншей описывали отдельно. Параметры, характеризующие сообщество в целом, например сомкнутость крон и т.п., на этом этапе не учитывали.

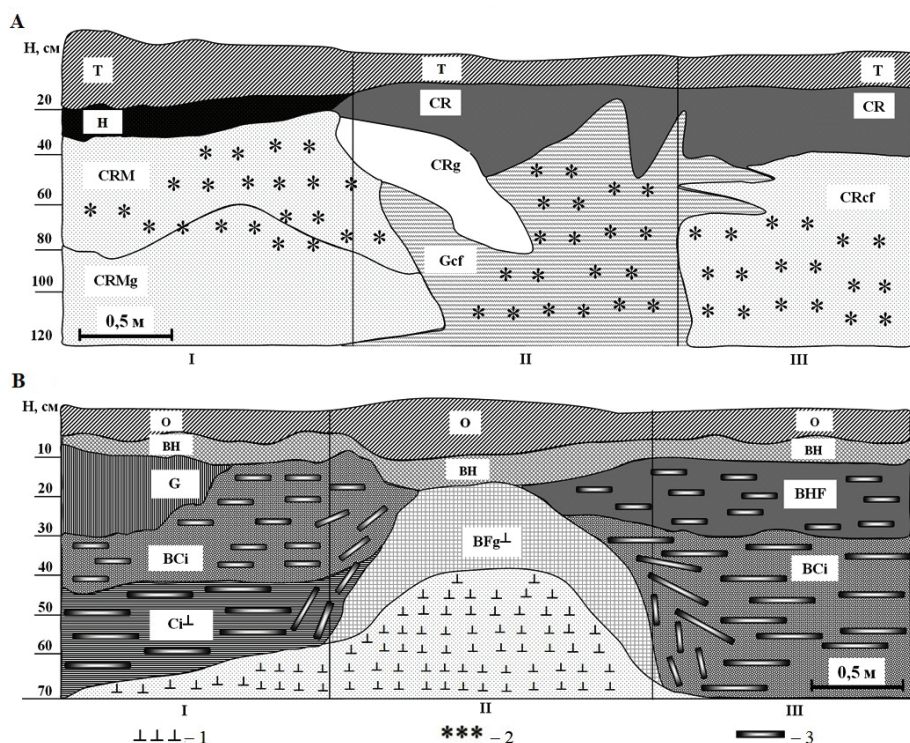


Рис. 2. Схемы исследованных траншей: А – траншея горно-лесного пояса; В – траншея горно-тундрового пояса. I, II, III – номера сегментов. 1 – подстиление многолетнемерзлыми породами, 2 – грунтовый лед, 3 – обломки горных пород
[Fig. 2. Schemes of the investigated trenches. A - Trench of the mountain forest belt, B - Trench of the alpine tundra belt. I, II, III - Segment numbers. 1 - Permafrost, 2 - Ground ice, 3 - Fragments of rocks]

Почвенные образцы для химического анализа отобраны по горизонтам. Диагностику и классификационное положение почв осуществляли согласно

«Полевому определителю почв России» [22] и международной классификации почв WRB [23]. Для исследованных почв определяли основные физико-химические параметры: кислотность, валовое содержание углерода, азота, обменные формы кальция и магния, содержание железа и алюминия [24]. Содержание углерода и азота определяли на элементном анализаторе EA-1110 (Carlo Erba, Италия) в ЦКП «Хроматография» Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН [25]. Определение pH – потенциометрически со стеклянным электродом (Аквилон И-500, Россия) с соотношением почва:раствор (для органогенных горизонтов – 1:25, для минеральных – 1:2,5). Гранулометрический состав определяли по методу Качинского [26]. Содержание оксалаторастворимых форм железа и алюминия, растворимых в кислом растворе оксалата аммония, диагностировали методом атомно-эмиссионной спектрометрии. Для извлечения из почвы дитиониторастворимых форм соединений железа вне зависимости от степени окристаллизованности использовали метод Мера–Джексона, критерий Швертмана рассчитывали по формуле ($K_{ш} = Fe_{ox} / Fe_{dith}$) [27].

Результаты исследования и обсуждение

Морфологические свойства исследуемых почв

Горно-лесной пояс (рис. 3, А)

Кочковатый микрорельеф в горно-лесном поясе характеризует появление спорадически-пятнистых ЭПА, обусловленных специфическими процессами биологической природы – предельно структурными элементами (ПСЭ) [28]. К таким элементам можно отнести приствольные повышения, межкроновые западины и моховые кочки, которые определяют различия в напочвенном покрове. В траншее горно-лесного пояса по сегментам наблюдается смена доминантов мохово-лишайникового яруса. В первом сегменте, расположенном в приствольном пространстве, доминируют сфагновые мхи. Во втором сегменте доминантами являются политриховые мхи, в третьем – зеленые мхи. Известно, что такие изменения в составе напочвенного покрова свидетельствуют о снижении степени увлажнения почв [29]. Таким образом, напочвенный покров и морфологическое строение почв в пределах отдельных сегментов имеют ряд отличий.

I сегмент – сфагновый

Кустарники: Сомкнутость 0,1–0,2. *Betula nana* L. высотой до 0,6 м.

Травяно-кустарничковый ярус: ОПП 20–30%. Доминирует *Carex vaginata* Tausch. До 20% приходится на *Vaccinium vitis-idaea* L., 5–10% – *Rubus chamaemorus* L.

Мохово-лишайниковый ярус: ОПП 95%. Доминант (более 80%) – *Sphagnum girgensohnii* Russow. 10–20% приходится на *Polytrichum commun* Hedw.

Под представленной растительностью формируется торфяно-перегноино-криометаморфическая почва (*Histic Cambi-Turbic Cryosol* (Hu-

mic)) (рис. 3, А-I). Строение профиля: Т (0–20 см) – Н (20–30 см) – CRM (30–80 см) – CRMg (80–120 см). Характерной особенностью криометаморфической почвы является рассыпчатая пластинчато-плитчатая структура горизонта CRM, формирующаяся под влиянием сезонных процессов промерзания/оттаивания [30]. В профиле почвы встречается сезонная мерзлота несливающегося типа, которая образуется в местах накопления снега в зимний период и хорошего дренажа в летний. Кроме этого, следует подчеркнуть вероятное влияние ели, на пристовольном возвышении которой сформировались моховая подушка и перегнойный горизонт Н.

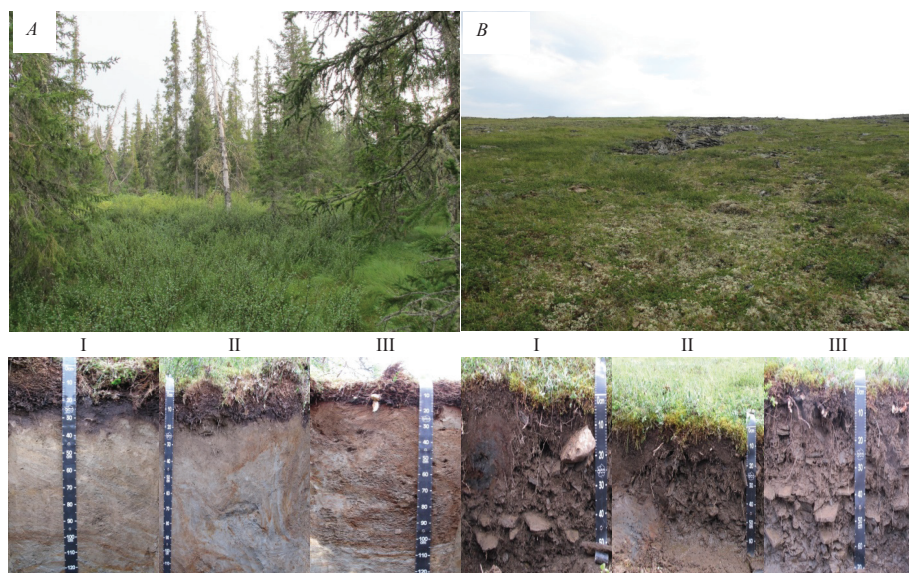


Рис. 3. Растительность и почвы исследованных траншей:

A – траншея горно-лесного пояса; *B* – траншея горно-тундрового пояса.

I, II, III – номера сегментов. Автор фото А.А. Дымов

[Fig. 3. The vegetation and soil of the investigated trenches. A - Trench of the mountain forest belt, B - Trench of the alpine tundra belt. I, II, III - Segment numbers. Photos by AA Dymov]

II сегмент – долгомошный

Кустарники: Сомкнутость 0,2–0,3. *B. nana* высотой до 0,7 м.

Травяно-кустарничковый ярус: ОПП 30%. Три вида. Доминирует *C. vaginata*. До 10% *R. chamaemorus*. Единично *V. vitis-idaea*.

Мохово-лишайниковый ярус: ОПП 90%. Три вида. Доминант (более 70%) – *P. commune*. До 25% *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. Доля *S. girgensohnii* не превышает 2–3%.

Почва представлена торфяно-криозёмом глеевым криогенно-ожелезнённым (*Histic Cryosol (Turbic, Reguistaquic)*) (рис. 3А-II). Строение профиля: Т (0–15 см) – CR (15–50 см) – CRg (25–80 см) – Gcf (20–120 см). Глеевый

горизонт Gcf имеет вихреобразный рисунок, что является отличительной чертой почв криогенного отдела. Признаком криогенного влияния для почв гумидных областей является миграция закисных форм оксида железа к фронтам промерзания. Профиль торфяно-криозёма содержит охристые микрогоризонты, где оксиды железа пропитывают структурные агрегаты, также концентрируясь в мелкие конкреции или ржавые пятна, что дает основание для выделения криогенно-ожелезнённого подтипа [31].

III сегмент – зеленомошно-долгомошный

Кустарники: Сомкнутость 0,1–0,2. *B. nana* высотой до 0,6 м.

Травяно-кустарничковый ярус: ОПП 30%. Согосподствуют два вида: *C. vaginata* и *V. vitis-idaea*.

Мохово-лишайниковый ярус: ОПП 90%. Согосподствуют два вида: *P. commune* и *P. schreberi*.

Почва сегмента III – торфяно-криозём криогенно-ожелезнённый (*Histic Cryosol*) (рис. 3, А-III). Строение профиля: Т (0–14 см) – CR (14–40 см) – CRcf (40–120 см). Однако в профиле отсутствуют криогенный вихревой рисунок и признаки оглеения. Нижележащий горизонт CRcf характеризуется отсутствием ярко выраженной структуры, большим количеством горизонтальных прослоек грунтового льда (линзы льда) и трубчатых железистых конкреционных новообразований.

Предельные структурные элементы играют важную роль в формировании СПП. Высокая гетерогенность напочвенного покрова обуславливает специфичность формирования различных почвенных комбинаций [1]. Таким образом, показано, что в пределах нескольких метров почвы, формирующиеся под различными ПСЭ элементарного почвенного ареала, могут быть тесно связаны между собой, но и иметь хорошо диагностируемые генетические отличия. Для горно-лесного пояса Приполярного Урала нами впервые был выделен тип криоземов криогенно-ожелезнённых. Ранее тип криоземов был отмечен только для горно-тундрового пояса [32]. Однако схожие криоземы встречаются в горных лесах Хэнтэйского нагорья в Монголии [33], в структуре почвенного покрова горных экосистем Красноярского края 9% от всей площади почв составляют криоземы с комбинациями палеокриоземов [34].

Горно-тундровый пояс (рис. 3, В)

В горно-тундровом поясе формируются регулярно-циклические ЭПА. Они характеризуются «пятнами» почв, обусловленных периодическим пучением и растрескиванием почвенной толщи в результате замерзания и оттаивания, что характерно для мерзлотных почв Приполярного Урала. Профиль траншеи горно-тундрового пояса содержит большое количество обломков горных пород, составляющих примерно 50–70% от объема. Важной характеристикой микрорельефа является расположение траншеи перпендикулярно куруму, располагающемуся в 15 м, что обуславливает проявление такого явления, как криогенная десерпция. Многолетнемерзлые породы в траншее появляются на глубине 40–60 см. Согласно многочисленным прикопкам ме-

зоструктуру почвенного покрова можно определить как сочетания-мозаики [3]. Почвы горно-тундрового пояса характеризуются хорошо выраженным иллювиально-гумусовым горизонтом и представлены несколькими подтипами подбуров.

I сегмент – зеленомошный

Кустарники: Сомкнутость 0,3. Число видов – три. Преобладает *B. nana*. Единично *Salix glauca* L. и *S. recurvigemma* A.K. Skvortsov.

Травяно-кустарничковый ярус: ОПП 10%. Доминант (более 90% ОПП) – *C. arctisibirica* (Jurtzev) Czerep., единично *Hierochloe alpina* (Sw.) Roem. & Schult. и *Pedicularis compacta* Stephan.

Мохово-лишайниковый ярус: ОПП 98%. Более 50% – *Aulacomnium turgidum* (Wahlenb.) Schwägr. *P. schreberi* – до 35%. Лишайники 5–7%: *Cetraria islandica* (L.) Ach., *Cladonia arbuscula* (Wallr.) Flot. Единично *Dicranum scoparium* Hedw.

Профиль подбур глеевого глинисто-иллювирированного мерзлотного (*Stagnic Entic Podzol* (*Skeletal, Turbic, Reductaquic*)) (рис. 3, B-I) в сегменте I характеризуется маломощной грубогумусированной подстилкой и подстиланием ММП с глубины 60 см (рис. 2, B). Строение: О (0–5 см) – ВН (5–11 см) – G (11–30 см) – BCi (11(30)–40(45) см) – Ci \perp (40(45)–60 см). Процесс оглеения наиболее контрастно проявляется в горизонте G, который характеризуется наибольшим количеством мелкозема в профиле почвы. На верхней поверхности обломков пород присутствуют глинистые пленки мощностью до 1–2 мм. Кровля ММП залегает на глубине 40 см и представляет собой высокольдистый слой с примесью мелкозема. Предположительно это разновидность гольцового подземного льда, который образует отдельные пласты до 3 м мощности, заполняет промежутки между обломками горных пород.

Травяно-кустарничковый ярус: ОПП 10–15%. Доминант (более 90%) *C. arctisibirica*. До 5% приходится на *Dryas octopetala* L., единично отмечены *Lagotis minor* (Willd.) Standl. и *V. vitis-idaea*.

Мохово-лишайниковый ярус: ОПП 98%. Более 80% приходится на *P. schreberi*. Проективное покрытие *Aulacomnium turgidum* до 5%. Единично – *C. arbuscula*, *Polytrichum juniperinum* Hedw. и *Stereocaulon paschale* (L.) Hoffm.

Во II сегменте формируется подбур иллювиально-гумусовый глееватый мерзлотный (*Folic Cryosol* (*Skeletal, Humic*)) (см. рис. 3, B-II). Строение: О (0–10(13) см) – ВН (10(13)–20 см) – BFg \perp (20–40(70) см). Отличительной чертой II сегмента является отсутствие обломков горных пород в профиле, которые вытеснены в стороны и «поставлены на ребро». Вероятно, это связано с криогенной десерпцией (приподыманием) обломков в результате образования льда в промежутках между ними, что является основным механизмом движения курумов. В нашем случае в сегменте II произошло вытеснение ММП к поверхности и рассортировка обломочного щебнистого материала в противоположные стороны от мерзлоты.

III сегмент – лишайниковый

Кустарники: Сомкнутость 0,4–0,5. Содоминируют *B. nana* и *S. glauca*. Отмечена *S. recurvigemis*.

Травяно-кустарничковый ярус: ОПП 10%. Доминант (более 90% ОПП) *C. arctisibirica*. 5% *V. vitis-idaea*, единично *H. alpina* и *Bistorta vivipara*.

Мохово-лишайниковый ярус: ОПП 98%. Более 50% покрытия – *C. islandica*. До 20% *P. schreberi*.

Третий сегмент траншеи представлен *подбуром глинисто-иллювирированным (Stagnic Entic Podzol (Skeletal, Turbic))* (рис. 3, В-III). Строение: О (0–7 см) – ВН (7–9(13) см) – ВНf (9(13)–30 см) – ВСi (30–70 см). С глубины 70 см почва характеризуется обильным подстиланием обломками горных пород, обуславливающим минимальное количество мелкозема и хороший почвенный дренаж, который, в свою очередь, препятствует застою влаги и образованию условия для процессов оглеения. Аналогично сегменту I с глубины 30 см на верхней поверхности горизонтальных граней обломков пород появляются глинистые пленки мощностью до 2 мм.

Таким образом, в результате воздействия криогенеза в почвах горно-тундрового пояса происходящие изменения в выраженности морфологических почвенных признаков (наличие оглеения, образование криогенной структуры, ожелезнение) приводят к значительному разнообразию почв в пространстве. Почвенные комбинации траншей горно-лесного и горно-тундрового поясов, состоящие из трех почв в пределах одной траншеи, сложно включить в рамки существующих норм при почвенном картировании, в которых рассматриваются преобладающие ЭПА [35], особенно для почв труднодоступных горных территорий [36].

Свойства исследуемых почв

Анализ гранулометрического состава (таблица) исследованных почв горно-лесного пояса показал, что почвы характеризуются высоким содержанием фракции физической глины. Согласно классификации Качинского [25], по суммарному содержанию частиц физической глины (<0,01) можно сказать, что торфяно-перегнойно-криометаморфическая почва (сегмент I) развивается на легких/средних суглинках. Максимальное суммарное содержание частиц <0,01 составляет 34% в средней части профиля. Криоземы (сегменты II и III) формируются на средних суглинках. Содержание частиц физической глины для торфяно-криозема глеевого криогенно-ожелезненного максимально – 38%, а для торфяно-криозема криогенно-ожелезненного – 41%. Несмотря на существенное пространственное варьирование морфологических признаков между сравниваемыми сегментами, распределение фракции физической глины не имеет четко выраженной дифференциации по профилю.

Для почв горно-тундрового пояса выявлено преобладание крупных фракций мелкозема. Из анализа гранулометрического состава почв траншей горно-тундрового пояса следует, что подбур глееватый глинисто-иллюви-

рованный мерзлотный развивается на легких высокощелочистых суглинках. Содержание частиц <0,01 варьирует от 8 до 30%.

Физико-химические и физические свойства исследованных почв
[Physical and chemical properties of soils]

| No | Гори- зонт [Horizon] | Глубина, см [Depht, cm] | pH | | Обменные катионы [Exchangeabe cations] | | Содержание фракций [Content of fractions] | |
|---|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|---------------------|---|------------------|--|-------|
| | | | H ₂ O _{water} | KCl _{salt} | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | <0,001 | <0,01 |
| | | | | | ммоль/100 г [mmol/100 g] | | % | |
| Траншея горно-лесного пояса [Trench of the mountain-forest belt] | | | | | | | | |
| I | T | 0–20 | 4,4 | 3,4 | 10,5 | 5,3 | | |
| | H | 20–30 | 4,7 | 3,7 | 5,9 | 0,5 | | |
| | CRM | 30–80 | 5,4 | 3,6 | 8,4 | 2,5 | 17 | 34 |
| | CRMg | 80–120 | 5,9 | 4,0 | 10,1 | 3,2 | 17 | 33 |
| II | T | 0–15 | 4,4 | 3,3 | 8,8 | 4,4 | | |
| | CR | 15–50 | 4,9 | 3,6 | 4,2 | 1,5 | 18 | 38 |
| | CRg | 25–80 | 5,8 | 3,9 | 10,9 | 3,6 | 19 | 38 |
| | Gcf | 20–120 | 5,9 | 4,1 | 11,5 | 3,8 | 22 | 36 |
| III | T | 0–14 | 4,4 | 3,4 | 14,7 | 4,8 | | |
| | CR | 14–40 | 5,1 | 3,6 | 5,4 | 2,4 | 19 | 37 |
| | CRcf | 40–120 | 5,8 | 4,0 | 8,8 | 3,8 | 25 | 41 |
| Траншея горно-тундрового пояса [Trench of the alpine tundra belt] | | | | | | | | |
| I | O | 0–5 | 5,2 | 4,1 | 14,8 | 4,3 | | |
| | BH | 5–11 | 5,0 | 3,6 | 5,3 | 1,3 | 10 | 20 |
| | G | 11–30 | 4,7 | 3,6 | 1,7 | 0,5 | 11 | 30 |
| | BCi | 11(30)–40(45) | 5,6 | 3,8 | 2,1 | 3,5 | 6 | 15 |
| | Cl ₁ | 40(45)–60 | 5,7 | 3,3 | 2,5 | 4,7 | 4 | 8 |
| II | O | 0–10(13) | 5,1 | 4,1 | 21,8 | 5,8 | | |
| | BH | 10(13)–20 | 5,1 | 3,6 | 5,8 | 1,3 | 10 | 26 |
| | BFG _L | 20–40(70) | 4,9 | 3,6 | 1,5 | 0,4 | 12 | 31 |
| III | O | 0–7 | 5,1 | 4,0 | 23,2 | 4,7 | | |
| | BH | 7–9(13) | 4,7 | 3,7 | 6,1 | 1,0 | 13 | 21 |
| | BHF | 9(13)–30 | 5,4 | 3,6 | 0,7 | 0,3 | 7 | 11 |
| | BCi | 30–70 | 5,7 | 3,7 | 2,4 | 0,6 | 4 | 10 |

Подбур иллювиально-гумусовый глееватый мерзлотный – на средних суглинках (31% частиц <0,01 мм). Подбур глинисто-иллювиальный – от легких суглинков до супеси (до 21% частиц физической глины). Полученные результаты подтверждаются литературными данными [37, 38], в которых показано, что в условиях криогенеза в почвообразующих породах легко-среднесуглинистого состава происходит накопление частиц крупнопылеватого размера. В нижней части профиля альфегумусовых почв увеличивается содержание среднего и мелкого песка, а утяжеление гранулометрического состава оказывает влияние на почвенный дренаж, в результате чего образуются условия для восстановительного процесса и почвенного

оглеения. Учитывая суровые климатические условия горно-тундрового пояса, близкое залегание многолетнемерзлых пород и высокую щебнистость по всему профилю в рассматриваемых горных почвах Приполярного Урала, важную роль в соотношении гранулометрических фракций играют криогенные процессы [39].

Почвы исследованных траншей имеют слабокислую реакцию среды как водной, так и солевой вытяжек (см. таблицу). Органогенные горизонты обладают наибольшей кислотностью. Показано, что моховые органогенные горизонты почв горно-лесной траншеи несколько более кислые (рН 4,4), чем маломощные грубогумусированные подстилки почв горно-тундрового пояса (рН 5,1). В минеральных горизонтах происходит плавное уменьшение кислотности с глубиной до близких к нейтральным значениям. Значения рН водной вытяжки минеральных горизонтов достигали в почвах горно-лесного пояса 5,9 ед. рН, для почв горно-тундрового пояса – 5,7 ед. рН. Полученные данные соотносятся с результатами по криоземам, развивающимся в лиственничниках Средней Сибири, где рН в подстилке достигал 4,7, а в минеральных горизонтах – 6,1 [40], и данными для криогенных почв Западной Антарктики, в которых величина рН также изменяется от слабокислой в органогенных горизонтах до нейтральной в нижних минеральной части профиля [41]. Это говорит о сродстве климатических условий, характере растительности между сравниваемыми регионами, в результате чего формируются схожие типы почв с подобными химическими показателями. В целом тенденция уменьшения кислотности с глубиной сохраняется для всех исследованных почв.

В результате биогенного накопления наибольшие концентрации обменных форм кальция и магния как для почв траншей горно-лесного, так и горно-тундрового пояса наблюдаются в органогенных горизонтах. В составе обменных катионов преобладает Ca^{2+} . Происходит заметное варьирование содержания обменных катионов в горизонтальном направлении от сегмента I до сегмента III, которое, вероятно, определяется характером напочвенной растительности. В почвах горно-лесного пояса содержание Ca^{2+} изменялось от 8,8 до 14,7 ммоль/100 г при уменьшении в напочвенном покрове доли сфагновых и увеличении доли зеленых мхов, что характерно для лесных почв с низкой степенью насыщенности оснований [42]. В почвах горно-тундрового пояса содержание Ca^{2+} составляет от 14,7 до 23,2 ммоль/100 г и коррелирует с возрастанием в напочвенном покрове доли лишайников и уменьшением доли мхов. Вероятно, что при уменьшении увлажненности условий формирования органогенного горизонта происходит увеличение содержания обменных оснований. Содержание Mg^{2+} в подстилках почв обеих траншей близкое: от 4,4 до 5,3 ммоль/100 г в горно-лесном поясе и от 4,2 до 5,7 ммоль/100 г в горно-тундровом. Для минеральных горизонтов почв горно-лесного пояса характерно элювиально-иллювиальное распределение Ca^{2+} и Mg^{2+} , для почв горно-тундрового пояса – аккумулятивное.

Анализ содержания дитионито- (по Джексону) и оксалоторастворимых (по Тамму) форм железа и алюминия показал значительные различия между почвами в траншее горно-лесного пояса (рис. 4).

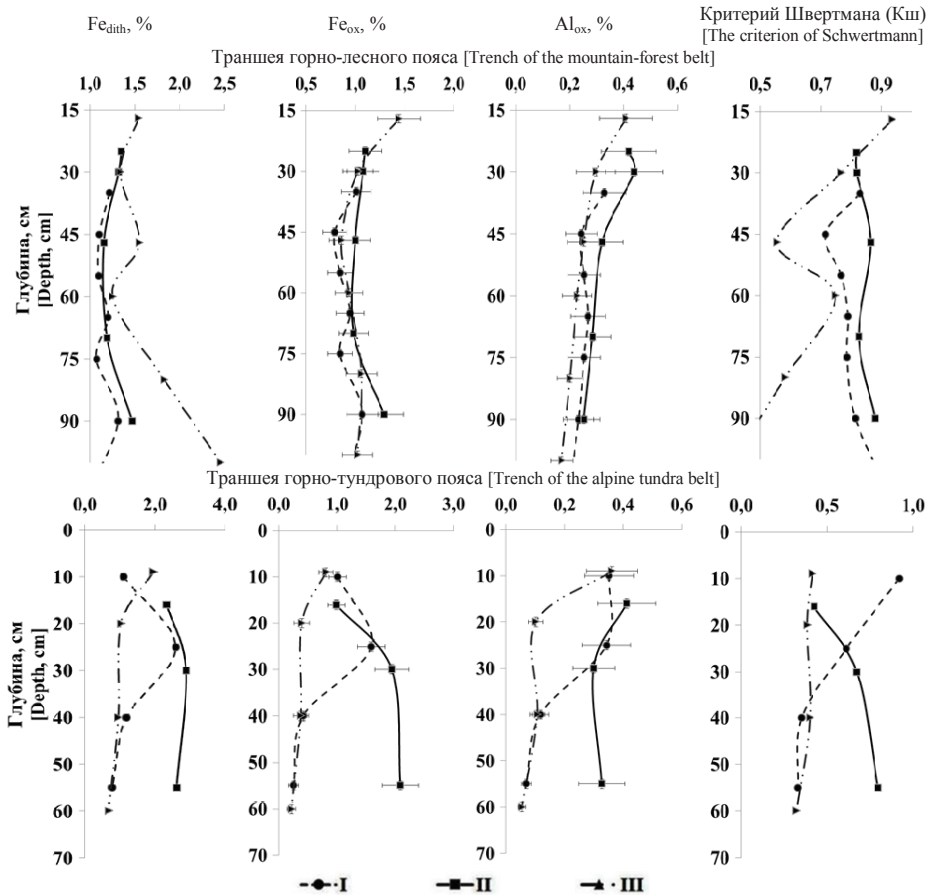


Рис. 4. Профильное распределение содержания дитиониторастворимых (Fe_{dith}) форм железа и оксалоторастворимых форм железа (Fe_{ox}) и алюминия (Al_{ox}) и критерия Швертмана в минеральных горизонтах исследуемых почв.

Обозначения: I, II, III – номера сегментов

[Fig. 4. Profile the distribution of Fe_{ox} and Fe_{dith} forms of iron and forms of aluminium Al_{ox} and the criterion of Schwertmann in the studied soils. Designations: I, II, III - Numbers of segments]

От первого к третьему сегменту наблюдается увеличение содержания форм железа в криоэмах. Максимальное содержание Fe_{ox} увеличивается от 0,84% в сегменте I до 1,44% в сегменте III. Накопление Fe_{dith} от первого до третьего сегмента варьирует от 0,91 до 2,46%. Для почв горно-тундрового пояса высокие концентрации соединений железа характерны для горизонтов

с признаками оглеения. В горизонте G сегмента I содержание оксалаторастворимых форм составляло 1,59%, а дитионитрастворимых – 2,59%. В горизонте BFg – 2,01 и 2,75% соответственно. Согласно критерию Швертмана (Кш), полученные для почв горно-лесного пояса значения (до 0,88) свидетельствуют о высокой степени застойного увлажнения исследуемых почв (см. рис. 4) [43]. Кроме того, согласно исследованиям, направленным на изучение различных форм соединений железа [44–46], высокие значения Кш при застойном увлажнении указывают на увеличение размеров кристаллов гидроксида железа в мелкозем и конкрециях, что согласуется с полученными нами данными. Более низкие значения Кш, выявленные для почв горно-тундрового пояса, вероятно, характеризуют процессы промывного водного режима.

По основным физико-химическим параметрам почвы горно-лесного пояса близки к таежным почвам, которые формируются на равнинных территориях [31, 47]. Полученные результаты также сопоставимы с данными [32, 48] для мерзлотных почв Сибири.

Согласно литературным данным [49, 50], высокие концентрации органического углерода характерны для почв северных регионов. В результате проведенных исследований обнаружено, что распределение углерода и азота в исследованных почвах Приполярного Урала носит регрессивно-аккумулятивный характер с максимальным накоплением в органогенных горизонтах. С глубиной концентрации углерода и азота значительно снижаются. Содержание углерода в подстилке почв горно-лесного пояса достигает 43,3%, азота – 1,5%. В подстилках почв горной тундры содержится до 42,3% углерода и до 1,3% азота соответственно. Однако значительный интерес представляют минеральные горизонты почв исследованных траншей. В почвах горно-тундрового пояса содержание углерода и азота значительно выше, чем в почвах горно-лесного пояса (рис. 5), что, вероятно, можно объяснить близким залеганием к поверхности ММП и высокой щебнистостью почвенного профиля, которые способствуют перемещению (криотурбация) растительных остатков вниз по профилю к минеральным горизонтам, тем самым увеличивая содержание органического вещества в них.

Высокие концентрации углерода выявлены в верхних минеральных горизонтах почв горно-тундрового пояса для первого и второго сегментов, характеризующихся близким подстиланием ММП, которые служат «барьером» и способствуют аккумуляции органического вещества в надмерзлотных горизонтах. Максимальные концентрации углерода наблюдаются в иллювиально-гумусовых горизонтах (ВН), которые характеризуются большей пропиткой органическим веществом – от 5,5% в сегменте I до 9,1% в сегменте III. Пределы варьирования содержания азота в почвах горно-тундрового пояса от 0,03 до 0,67%. В почвах горно-лесного пояса содержание углерода в минеральных горизонтах значительно ниже и изменяется от 0,38 до 1,49%, азота – от 0,05 до 0,17%. Это дает основание предполагать, что мобильность органического вещества в почвах горных тундр выше, чем в горно-лесном поясе.

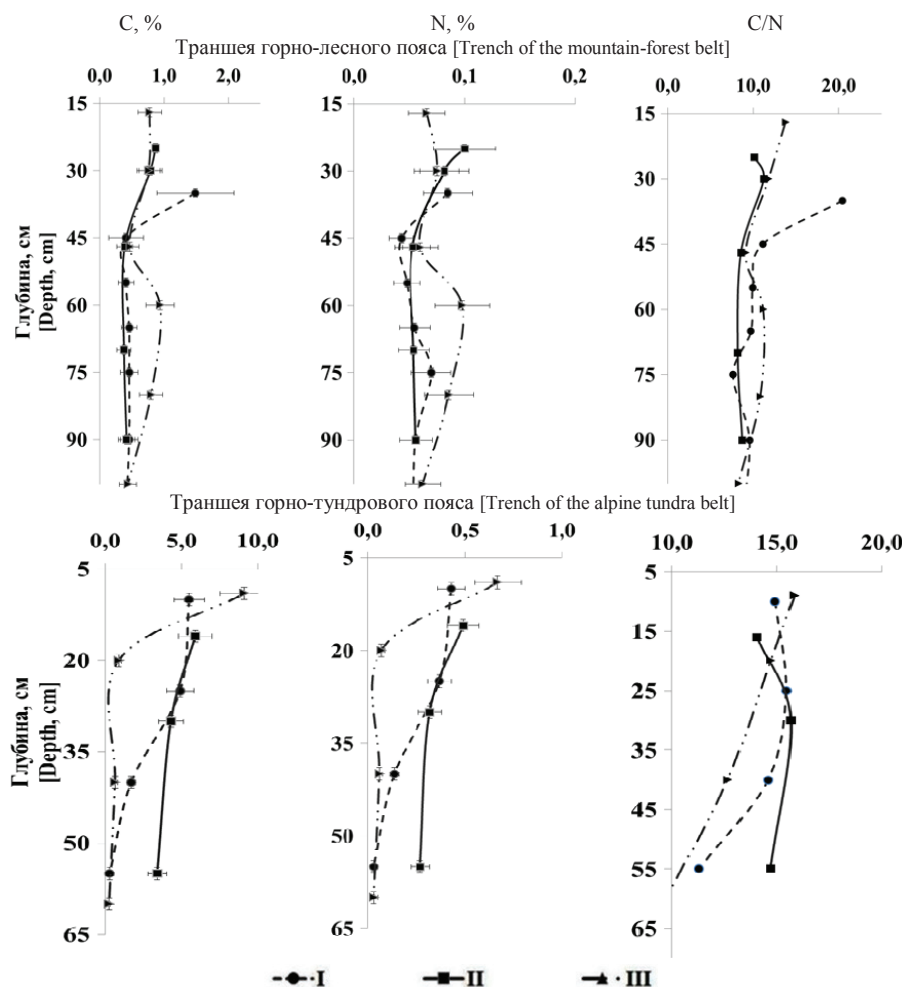


Рис. 5. Профильное распределение содержания углерода, азота и C/N в минеральных горизонтах исследуемых почв. Обозначения: I, II, III – номера сегментов.

[Fig. 5. Profile distribution of carbon, nitrogen and C/N content in mineral horizons.

Designations: I, II, III - Numbers of segments]

Кроме этого, промерзание маломощных почвенных профилей горно-тундрового пояса оказывает большое влияние на интенсивность почвенных процессов, при этом сокращается активный период почвообразования, тогда как формирующиеся под мощными органогенными горизонтами почвы горно-лесного пояса более «защищены» от промерзания. Проведённые ранее исследования показали [18], что почвы горно-тундрового пояса Приполярного Урала формируются в более суровых климатических условиях и характеризуются замедленной трансформацией и, вероятно, лучшей консервацией органического вещества в верхних горизонтах почв [51–53].

Заключение

Таким образом, изучение неоднородности морфологических, физико-химических и физических свойств почв Приполярного Урала позволило выявить существенные различия не только между почвами, расположенными в разных высотных поясах, но и между почвами в пределах одной траншеи. Показано, что исследованные почвы формируются в разных элементарных почвенных ареалах: в горно-лесном поясе – в спорадически-пятнистом; горно-тундровом – в регулярно-циклическом ЭПА.

В результате выявлено, что для исследуемых почв характерно значительное варьирование морфологических признаков, на основе которых диагностируются разные типы и подтипы почв на протяжении нескольких метров. Показано, что именно они в первую очередь служат классификационной основой как в пределах одной траншеи, так и в разных высотных поясах, в то время как другие показатели имеют более консервативный характер и служат как уточняющая аналитическая характеристика.

На основе физико-химических показателей установлено, что увеличение содержания обменных форм кальция и магния определяется сменой доминантов напочвенного покрова, которые маркируют различные условия увлажнения экосистемы. Основные различия между почвами разных высотных растительных поясов наблюдаются в минеральных горизонтах. Выявлено, что в средней части профиля почв горно-тундрового пояса из-за более суровых климатических условий, высокой доли обломков коренных пород в профиле, близкого подстилания многолетнемерзлых пород лучше сохраняются и аккумулируются органический углерод и азот, чем в почвах горно-лесного пояса.

Литература

1. Фридланд В.М. О структуре (строении) почвенного покрова // Почвоведение. 1965. № 4. С. 15–28.
2. Лойко С.В., Герасько Л.И., Кулижский С.П., Амелин И.И., Истигечев Г.И. Строение почвенного покрова северной части ареала черневой тайги юго-востока Западной Сибири // Почвоведение. 2015. № 4. С. 410–423. doi: [10.7868/S0032180X15040061](https://doi.org/10.7868/S0032180X15040061)
3. Горячкин С.В. Почвенный покров Севера (структура, генезис, экология, эволюция). М.: ГЕОС, 2010. 414 с.
4. Kneisel C., Emmert A., Polich P., Zollinger B., Egli M. Soil geomorphology and frozen ground conditions at a subalpine talus slope having permafrost in the eastern Swiss Alps // Catena. 2015. № 133. PP. 107–118. doi: [10.1016/j.catena.2015.05.005](https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.05.005)
5. Mu C., Zhang T., Zhang X., Cao B., Peng X., Cao L., Su H. Pedogenesis and physicochemical parameters influencing soil carbon and nitrogen of alpine meadows in permafrost regions in the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau // Catena. 2016. № 141. PP. 85–91. doi: [10.1016/j.catena.2016.02.020](https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.02.020)
6. Лойко С.В., Раудина Т.В., Кулижский С.П., Покровский О.С. Гидрохимические параметры растворов торфяных почв вдоль широтного градиента криолитозоны Западной Сибири // Современные проблемы науки и образования. 2017. № 4. С. 177–187. doi: [10.17513/spno.26599](https://doi.org/10.17513/spno.26599)

7. Оберман Н.Г. Геокриологические условия Европейской территории СССР и Урала. Геокриология СССР. М. : Недра, 1988.
8. Макеев О.В. Криогенные почвы // Криогенные почвы и их рациональное использование / ред. О.В. Макеев. М. : Наука, 1977. С. 5–13.
9. Горчаковский П.Л. Растительный мир высокогорий Урала. М. : Наука, 1975. 248 с.
10. Жангуров Е.В., Дубровский Ю.А., Дымов А.А. Характеристика почв и растительного покрова высотных поясов хребта Малдындыр (Приполярный Урал) // Известия Коми НЦ УрО РАН. 2012. № 4. С. 46–52.
11. Кудряшова С.Я., Дитц Л.Ю., Чичулин А.В., Чумбаев А.С., Миллер Г.Ф., Безбородова А.А. Эколого-географические аспекты выделения типов комплексов почв на плоскогорье Укок с использованием дистанционных исследований // Сибирский экологический журнал. 2012. № 5. С. 703–710. doi: [10.1134/S1995425512050046](https://doi.org/10.1134/S1995425512050046)
12. World Soil Resources Reports // Biological management of soil ecosystems for sustainable agriculture. Brazil : Londrina, 2002. 107 p.
13. Добровольский Г.В., Урусевская И.С. География почв. М. : КолосС, 2004. 460 с.
14. Дымов А.А., Жангуров Е.В., Старцев В.В. Почвы северной части Приполярного Урала: морфология, физико-химические свойства, запасы углерода и азота // Почвоведение. 2013. № 5. С. 507–516. doi: [10.7868/S0032180X1305002X](https://doi.org/10.7868/S0032180X1305002X)
15. Старцев В.В., Жангуров Е.В., Дымов А.А. Характеристика почв высотных поясов хребта Яптикырд (Приполярный Урал) // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. 2017. № 38. С. 6–27. doi: [10.17223/19988591/38/1](https://doi.org/10.17223/19988591/38/1)
16. Димо В.Н. Тепловой режим почв СССР. М. : Колос, 1972. 360 с.
17. Атлас по климату и гидрологии Республики Коми / под ред. А.И. Таскаева. М. : Дрофа, 1997. 116 с.
18. Старцев В.В., Жангуров Е.В., Дымов А.А. Годовая динамика температур органогенных горизонтов почв Приполярного Урала // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2016. № 2 (26). С. 28–35.
19. Дмитриев Е.А. Некоторые методологические аспекты изучения почв // Вестник Московского университета. Сер. 17: Почвоведение. 1997. № 2. С. 3–9.
20. Орлова М.А., Лукина Н.В., Камаев И.О., Смирнов В.Э., Кравченко Т.В. Мозаичность лесных биогеоценозов и продуктивность почв // Лесоведение. 2011. № 6. С. 39–48.
21. Ипатов В.С., Мирин Д.М. Описание фитоценоза. Методические рекомендации : учеб.-метод. пособие. СПб., 2008. 71 с.
22. Полевой определитель почв России. М. : Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
23. IUSS Working Group WRB. World reference base for soil resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. Rome : FAO, 2015.
24. Теория и практика химического анализа почв / под ред. Л.А. Воробьевой. М. : ГЕОС, 2006. 400 с.
25. Методика выполнения измерений содержания углерода и азота в твердых объектах методом газовой хроматографии на элементном анализаторе EA 1110 (CHNS-O): свидетельство об аттестации методики измерений / под ред. Б.М. Кондратенка, Е.В. Ванчиковой, А.Г. Естафьевой ; Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. № 88-17641-94-2009 (ФР.1.31.2014.17663).
26. Теории и методы физики почв / под ред. Е.В. Шеина, Л.О. Карпачевского. М. : Гриф и К, 2007. 616 с.
27. Mehra O.P., Jackson M.L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite–citrate system buffered with sodium bicarbonate // Clay Clay Miner. 1960. № 7. PP. 317–327.
28. Почвенные комбинации и их генезис / под ред. В.М. Фридланда. М. : Наука, 1972. 216 с.

29. Сукачѳв В.Н. Избранные труды : в 3 т. Проблемы фитоценологии / под ред. Е.М. Лавренко. Л. : Наука, 1975. Т. 3. 542 с.
30. Мудров Ю.В. Мерзлотные явления в криолитозоне равнин и гор. Основные понятия и определения. Иллюстрированный энциклопедический справочник. М. : Научный мир, 2007. 316 с.
31. Тонконогов В.Д. Автоморфное почвообразование в тундровой и таѳжной зонах Восточно-Европейской и Западно-Сибирской равнин. М. : Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2010. 304 с.
32. Старцев В.В., Дымов А.А., Прокушкин А.С. Почвы постпирогенных лиственничников Средней Сибири: морфология, физико-химические свойства и особенности почвенного органического вещества // Почвоведение. 2017. № 8. С. 912–925. doi: 10.7868/S0032180X17080111.
33. Краснощѳков Ю.Н. Структура почвенного покрова горных лесов Хѳнтѳйского нагорья в Монголии // Вестник Крас ГАУ. 2013. № 12. С. 77–82.
34. Ершов Ю.И., Москалев А.К., Степень Р.А. Земельные и лесные ресурсы Красноярского края, проблемы их рационального использования. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2001. 114 с.
35. Почвенное картирование: учеб.-метод. пособие / под ред. Б.Ф. Апарина, Г.А. Касаткиной. СПб. : Изд-во СПб. ун-та, 2012. 128 с.
36. Ананко Т.В., Герасимова М.И., Конюшков Д.Е. Почвы горных территорий в классификации почв России // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2018. № 92. С. 122–146. doi: [10.19047/0136-1694-2018-92-122-146](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-92-122-146)
37. Конищев В.Н. Формирование состава дисперсных пород в криолитосфере / под ред. А.И. Попова. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1981. 197 с.
38. Раудина Т.В., Кулижский С.П., Спирина В.З. Влияние криогенных процессов на формирование профиля почв центральной части Тазовского полуострова // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2015. Т. 1, № 1 (1). С. 33–44.
39. Egli M., Poulenard J. Soils of Mountainous Landscapes. In The International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment, and Technology / eds. by D. Richardson, N. Castree, M.F. Goodchild, A. Kobayashi, W. Liu, R.A. Marston. New York, NY : Wiley, 2017.
40. Gentsch N. Landscape controls of organic carbon content and fraction composition in permafrost soils, Central Siberia // Diploma Thesis. 2010. University Leipzig. Faculty for Physics and Geo Science Institute for Geography. 105 p.
41. Лупачев А.В., Абакумов Е.В. Почвы Земли Мѳри Бѳрд (Западная Антарктика) // Почвоведение. 2013. № 10. С. 1167–1180. doi: [10.7868/S0032180X13100079](https://doi.org/10.7868/S0032180X13100079)
42. Valtera M., Šamonil P. Soil organic carbon stocks and related soil properties in a primary *Picea abies* (L.) Karst. volcanic-mountain forest // Catena. 2018. № 165. PP. 217–227. doi: [10.1016/j.catena.2018.01.034](https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.01.034).
43. Водяницкий Ю.Н., Шоба С.А. Дискуссионные вопросы интерпретации результатов химической экстракции соединений железа из почв // Почвоведение. 2014. № 6. С. 697–704. doi: [10.7868/S0032180X14060112](https://doi.org/10.7868/S0032180X14060112)
44. Munch J.C., Ottow J.C.G. Preferential reduction of amorphous to crystalline iron oxides by bacterial activity // Soil Science 1980. № 129. PP. 15–21.
45. Бабанин В.Ф., Трухин В.И., Карпачевский Л.О., Иванов А.В., Морозов В.В. Магнетизм почв / под ред. В.В. Морозова. М. : Ярославль, 1995. 222 с.
46. Roden E.E., Zachara J.M. Microbial reduction of crystalline Fe (III) oxides: influence of oxide surface area and potential for cell growth // Environ. Sci. Technol. 1996. № 30. PP. 1618–1628.
47. Забоева И.В. Почвы и земельные ресурсы Коми АССР / под ред. И.П. Герасимова. Сыктывкар : Коми кн. изд-во, 1975. 344 с.

48. Лупачев А.В., Губин С.В. Органогенные надмерзлотно-аккумулятивные горизонты криозёмов тундр севера Якутии // Почвоведение. 2012. № 1. С. 57–68. doi: [10.1134/S1064229312010115](https://doi.org/10.1134/S1064229312010115)
49. Dutta K., Schuur E.A.G., Neff J.C., Zimov S.A. Potential carbon release from permafrost soils of northeastern Siberia // Glob. Chang. Biol. 2006. № 12 (12). PP. 2336–2351. doi: [10.1111/j.1365-2486.2006.01259.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01259.x)
50. Koven C., Friedlingstein P., Ciais P., Khvorostyanov D., Krinner G., Tarnocai C. On the formation of high-latitude soil carbon stocks: effects of cryoturbation and insulation by organic matter in a land surface model // Geophys. Res. Lett. 2009. № 36. L21501. PP. 1–5. doi: [10.1029/2009GL040150](https://doi.org/10.1029/2009GL040150)
51. White D.M., Garland D.S., Ping C.L., Michaelson G., Characterizing soil organic matter quality in arctic soil by cover type and depth // Cold Reg. Sci. Technol. 2004. № 38. PP. 63–73. doi: [10.1016/j.coldregions.2003.08.001](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2003.08.001)
52. Dymov A.A., Zhangurov E.V., Hagedorn F. Soil organic matter composition along altitudinal gradients in permafrost affected soils of the Subpolar Ural Mountains // Catena. 2015. № 131. PP. 140–148. doi: [10.1016/j.catena.2015.03.020](https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.03.020)
53. Henkner J., Scholten T., Kühn P. Soil organic carbon stocks in permafrost-affected soils in West Greenland // Geoderma. 2016. № 282. PP. 147–159. doi: [10.1016/j.geoderma.2016.06.021](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.06.021)

*Поступила в редакцию 24.06.2019 г.; повторно 13.09.2019 г.;
принята 25.09.2019 г.; опубликована 27.12.2019 г.*

Авторский коллектив:

Старцев Виктор Викторович – аспирант отдела почвоведения, Институт биологии Коми НЦ УрО РАН (Россия, 167000, Респ. Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28).

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6425-6502>

E-mail: vik.startsev@gmail.com

Дубровский Юрий Александрович – канд. биол. наук, н.с. отдела флоры и растительности Севера, Институт биологии Коми НЦ УрО РАН (Россия, 167000, Респ. Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28).

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7219-054X>

E-mail: dubrovsky@ib.komisc.ru

Жангуров Егор Васильевич – канд. сел.-хоз. наук, н.с. отдела почвоведения, Институт биологии Коми НЦ УрО РАН (Россия, 167000, Респ. Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28).

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4297-7536>

E-mail: zhan.e@mail.ru

Дымов Алексей Александрович – д-р биол. наук, в.н.с. отдела почвоведения, Институт биологии Коми НЦ УрО РАН (Россия, 167000, Респ. Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28).

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1284-082X>

E-mail: aadymov@gmail.com

For citation: Startsev VV, Dubrovsky YuA, Zhangurov EV, Dymov AA. Spatial heterogeneity of soil properties in the zone of sporadic distribution of permafrost (Subpolar Urals). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* = *Tomsk State University Journal of Biology*. 2019;48:32-55. doi: [10.17223/19988591/47/2](https://doi.org/10.17223/19988591/47/2) In Russian, English Summary

Viktor V. Startsev, Yuri A. Dubrovsky, Egor V. Zhangurov, Alexey A. Dymov

Institute of Biology of the Komi Science Centre, Ural Division of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, Russian Federation

**Spatial heterogeneity of soil properties in the zone
of sporadic distribution of permafrost (Subpolar Urals)**

The structure of the soil cover of the Subpolar Urals is characterized by diversity due to the combination of contrasting environmental conditions: a mosaic of vegetation, character of soil-forming rocks and topography. The study of the spatial variation of soil

properties will provide more accurate information about the features of the soil cover of the Subpolar Urals. The aim of this research was to study the spatial heterogeneity of the morphological and physical-chemical properties of soils of the polar Urals.

We carried out studies on the territory of "Yugyd va" National Park (63°59' N, 59°13' E) in the northern part of the Subpolar Urals (See Fig. 1). We examined morphological and physical-chemical properties of soils of the mountain-forest and mountain-tundra belts of the Subpolar Urals using the example of two trenches (See Fig. 2). The first trench was located in the mountain-forest belt (See Fig. 3A). Coordinates: 65°08'12.5"N, 60°51'24.0"E. The second trench was located in the alpine-tundra belt (See Fig. 3B). Coordinates: 65°02'06.3"N, 60°35'19.2"E. The trenches were divided into three segments. Diagnostics and position classification of soils was carried out in accordance with "Field guide of Russian soils" (2008) and the World Reference Base of Soil Resources, version 2015 (IUSS Working Group WRB, 2015). For the studied soils, we determined the main physical-chemical parameters: acidity, total contents of C and N, exchangeable cations – Ca^{2+} and Mg^{2+} , as well as the content of Fe_{ox} , Al_{ox} and Fe_{dith} (Vorob'eva LA, 2006). The contents of carbon and nitrogen were determined using elemental analyzer EA 1110 (Carlo Erba, Italy). Granulometric composition was determined according to the method of Kachinsky (Shein EV and Karpachevskii LO, 2007).

We showed that the heterogeneity of morphological properties may determine differences between soils within a few meters. We revealed that for the studied trenches the variation of morphological features determines major differences between soils. It is demonstrated that differences in the intensity of soil processes lead to a wide soil diversity. Thus, several types and subtypes of permafrost soils were identified. In the mountain forest belt are formed: Histic Cambi-Turbic Cryosol (Humic) in the first segment, Histic Cryosol (Turbic, Reductaquic) in the second segment, and Histic Cryosol in the third segment. In the alpine tundra belt are formed: Stagnic Entic Podzol (Skeletal, Turbic, Reductaquic) in the first segment, Follic Cryosol (Skeletal, Humic) in the second segment, and Stagnic Entic Podzol (Turbic, Skeletal) in the third segment. The analysis of granulometric composition of the studied soils of the mountain-forest belt showed that the soils are characterized by a high content of fraction of physical clay. For soils of the mountain tundra belt, we revealed the predominance of large fractions of physical sand (See Table. 1). The soils of the investigated trenches have a slightly acidic reaction medium. Organogenic horizons have the highest acidity. In mineral horizons, there is a smooth decrease in acidity with depth until close to slightly acidic values. We established that soils of the mountain-forest belt are more acidic (pH 4.4-5.7) than soils in the mountain tundra belt (pH 5.1-5.9). The result of biogenic accumulation of the largest concentration of exchange forms of Ca^{2+} and Mg^{2+} , like the trench of the mountain-forest and mountain tundra belt, was observed in organogenic horizons. In the soils of the mountain forest belt, the Ca^{2+} content ranged from 8.8 to 14.7 mmol/100 g with a decrease in sphagnum mosses in the vegetation cover and an increase in green mosses. In the soils of the tundra mountain belt, the Ca^{2+} content is from 14.7 to 23.2 mmol/100 g and correlates with an increase in lichens and a decrease in mosses in the vegetation cover. The analysis of iron compounds revealed that in the mountain forest belt zones the maximum Fe_{ox} content increases from 0.84 in segment I to 1.44% in segment III. Fe_{dith} accumulation from the first to the third segment varies from 0.91 to 2.46% (See Fig. 4). For soils of the mountain-tundra belt, high concentrations of iron compounds are characteristic of horizons with signs of overmoistening. In horizon G of segment I, the content of oxalation-soluble forms was 1.59%, and that of dithionite-soluble forms was 2.59%. In the BFG horizon, it was 2.01 and 2.75%. As a result of the studies, we showed that the distribution of carbon and nitrogen in the studied soils of the Subpolar Urals gradually decreases along the profile (See Fig. 5). The carbon

content in the soil litter of the mountain forest belt reaches 43.3%, and that of nitrogen - 1.5%. The litter of soils of the mountain tundra contains up to 42.3% carbon and up to 1.3% nitrogen, respectively. However, in the mineral horizons of soils of the mountain-tundra belt, the content of carbon and nitrogen is much higher than in soils of the mountain-forest belt, which can be explained by the low biological activity of soils of mountain-tundra plant communities.

Thus, we illustrated that it is the morphological characters that primarily serve as the basis for determining the type of soil, both within the same trench and in different altitudinal zones, while the physicochemical parameters are more conservative and serve as a clarifying analytical characteristic. We found out that the increase in the content of Ca^{2+} and Mg^{2+} for both trenches is determined by the composition of the moss-lichen layer and a decrease in the moisture organic horizon. The content of C and N in the mineral horizons of soils of the mountain-tundra belt is much higher than in the soils of the mountain-forest belt. We showed that in the mineral horizons of soils of the mountain-tundra belt, due to more severe climatic conditions, a high proportion of bedrock fragments in the profile, and close occurrence of permafrost, organic carbon and nitrogen are better accumulated and preserved than in the soils of the mountain-forest belt.

The paper contains 5 Figures, 1 Table and 53 References.

Key words: Subpolar Urals; permafrost-affected soils; heterogeneity of properties; Cryosol; Stagnic Entic Podzol.

Funding: The study was carried out with the financial support of the RFBR Project No 18-34-00618 "Features of organic matter of soils of the polar Urals" and the Program of Fundamental Research No 18-4-4-14 "Diversity of the main components of ecosystems in the latitudinal and altitudinal gradients of the western macro-slope of the Northern and Subpolar Urals».

The authors declare no conflict of interest.

References

1. Fridland VM. O strukture (stroenii) pochvennogo pokrova [On the structure of soil cover]. *Eurasian Soil Science*. 1965;4:15-28. In Russian
2. Loyko SV, Geras'ko LI, Kulizhskiy SP, Amelin II, Istigechev GI. Soil cover patterns in the northern part of the area of aspen-fir taiga in the southeast of Western Siberia. *Eurasian Soil Science*. 2015;48(4):359-372. doi: [10.7868/S0032180X15040061](https://doi.org/10.7868/S0032180X15040061)
3. Goryachkin SV. Pochvennyy pokrov Severa (struktura, genezis, ekologiya, evolyutsiya) [The soil cover of the North (Structure, genesis, ecology, evolution)]. Moscow: GEOS Publ.; 2010. 414 p. In Russian
4. Kneisel C, Emmert A, Polich P, Zollinger B, Egli M. Soil geomorphology and frozen ground conditions at a subalpine talus slope having permafrost in the eastern Swiss Alps. *Catena*. 2015;133:107-118. doi: [10.1016/j.catena.2015.05.005](https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.05.005)
5. Mu C, Zhang T, Zhang X, Cao B, Peng X, Cao L, Su H. Pedogenesis and physicochemical parameters influencing soil carbon and nitrogen of alpine meadows in permafrost regions in the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Catena*. 2016;141:85-91. doi: [10.1016/j.catena.2016.02.020](https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.02.020)
6. Loyko SV, Raudina TV, Kulizhskiy SP, Pokrovskiy OS. Gidrokhimicheskie parametry rastvorov torfyanykh pochv vdol' shirotnogo gradienta kriolitozony Zapadnoy Sibiri [Hydrochemical parameters of solutions of peat soils along the latitudinal gradient of permafrost zone of Western Siberia]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*. 2017;4:177-187. doi: [10.17513/spno.26599](https://doi.org/10.17513/spno.26599) In Russian

7. Oberman NG. Geokriologicheskie usloviya Evropeyskoy territorii SSSR i Urala [Permafrost conditions of the European territory of the USSR and the Urals]. In: *Geokriologiya SSSR* [Geocryology of the USSR]. Ershov ED, editor. Moscow: Nedra Publ.; 1988. 454 p. In Russian
8. Makeev OV. Kriogennyye pochvy [Cryogenic soil]. In: *Kriogennyye pochvy i ikh ratsional'noe ispol'zovanie* [Cryogenic soils and their rational use]. Makeev OV, editor. Moscow: Nauka Publ.; 1977. pp. 5-13. In Russian
9. Gorchakovskiy PL. Rastitel'nyy mir vysokogoriy Urala [The flora of high mountains of the Urals]. Isaev EK, Litvak SA, Pokusaev VP and Zhmurkina IN, editors. Moscow: Nauka Publ.; 1975. 248 p. In Russian
10. Zhangurov EV, Dubrovskiy YuA, Dymov AA. Characteristics of soil and vegetation cover of the altitudinal belts of Mal'dy-nyrd ridge (Sub-polar Urals). *Izvestiya Komi Nauchnogo Tsentra URO RAN*. 2012;4:46-52. In Russian
11. Kudryashova SYa, Ditts LYu, Chichulin AV, Chumbaev AS, Miller GF, Bezborodova AA. Ecological-geographical aspects of soil complex types allocation at the Ukok Plateau using remote sensing studies. *Contemporary Problems of Ecology*. 2012;5(5):516-521. doi: [10.1134/S1995425512050046](https://doi.org/10.1134/S1995425512050046)
12. *World Soil Resources Reports. Biological management of soil ecosystems for sustainable agriculture*. Brazil: Londrina Publ.; 2002. 107 p.
13. Dobrovol'skiy GV, Urusevskaya IS. Geografiya pochv [Geography of soils]. Moscow: KolosS Publ.; 2004. 460 p. In Russian
14. Dymov AA, Zhangurov EV, Startsev VV. Soils of the northern part of the Subpolar Urals: Morphology, physicochemical properties, and carbon and nitrogen pools. *Eurasian Soil Science*. 2013;46(5):459-467. doi: [10.1134/S1064229313050025](https://doi.org/10.1134/S1064229313050025)
15. Startsev VV, Zhangurov EV, Dymov AA. Characteristics of soils in altitudinal belts of the Yaptiknyrd ridge (Subpolar Urals). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2017;38:6-27. doi: [10.17223/19988591/38/1](https://doi.org/10.17223/19988591/38/1) In Russian, English Summary
16. Dimo VN. Teplovoy rezhim pochv [The thermal regime of soils of the USSR]. Moscow: Kolos Publ.; 1972. 360 p. In Russian
17. *Atlas Respubliki Komi po klimatu i gidrologii* [Atlas of the Komi Republic on climate and hydrology]. Taskaev AI editor. Moscow: DiK. Drofa Publ.; 1997. 116 p. In Russian
18. Startsev VV, Zhangurov EV, Dymov AA. The annual temperature dynamics of soil organogenic horizons of the Subpolar Urals. *Izvestiya Komi Nauchnogo Tsentra URO RAN*. 2016;2(26):28-35. In Russian, English Summary
19. Dmitriev EA. Nekotorye metodologicheskie aspekty izucheniya pochv [Some methodological aspects of the study of soils]. *Vestn. Mosk. Un-ta. Ser. 17. Pochvovedenie = Moscow University Soil Science Bulletin*. 1997;2:3-9. In Russian
20. Orlova MA, Lukina NV, Kamaev IO, Smirnov VE, Kravchenko TV. Forest ecosystem mosaics and soil fertility. *Lesovedenie = Russian J Forest Science*. 2011;6:39-48. In Russian
21. Ipatov VS, Mirin DM. Opisanie fitotsenoza. Metodicheskie rekomendatsii. Uchebno-metodicheskoe posobie [Description of phytocenosis. Methodical recommendations]. Saint Petersburg: Saint Petersburg State Univ. Publ.; 2008. 71 p. Available at: http://geobotany.bio.spbu.ru/publish%20dep/Ip%20Mir2008_phytocendescription.pdf (accessed 21.05.2019). In Russian
22. *Polevoy opredelitel' pochv Rossii* [Field guide of soils in Russia]. Moscow: Pochvennyy institut im V.V. Dokuchaeva Publ.; 2008. 182 p. Available at: http://soils.narod.ru/download/field_guide_int.pdf (accessed 11.04.2017). In Russian
23. *IUSS Working Group WRB. 2015. World reference base for soil resources 2014, update 2015*. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. Rome: FAO; 2015. 192 p.
24. *Teoriya i praktika khimicheskogo analiza pochv* [Theory and practice of soils chemical analysis]. Vorob'eva LA, editor. Moscow: GEOS Publ.; 2006. 400 p. In Russian

25. Kondratenok BM, Vanchikova EV, Estaf'eva AG. Metodika vypolneniya izmereniy soderzhaniya ugleroda i azota v tverdykh ob'ektakh metodom gazovoy khromatografii na elementnom analizatore EA 1110 (CHNS-O): Svidetel'stvo ob attestatsii metodiki izmereniy № 88-17641-94-2009 [The method of measuring carbon and nitrogen in solid objects by gas chromatography in the elemental analyzer EA 1110 (CHNS-O): Certificate of attestation of measurement procedures No 88-17641-94-2009]. Syktyvkar: Institute of Biology of the KSC Publ.; 2006. 12 p. In Russian
26. *Teorii i metody fiziki pochv* [Theory and methods of soil physics]. Shein EV, Karpachevskii LO editors. Moscow: Grif i K Publ.; 2007. 616 p. In Russian
27. Mehra OP, Jackson ML. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clay Clay Miner.* 1960;7:317-327.
28. *Pochvennyye kombinatsii i ikh genezis* [Soil combinations and their genesis]. Fridland VM, editor. Moscow: Nauka Publ.; 1972. 216 p. In Russian
29. Sukachev VN. Izbrannye trudy v 3-kh tomakh. T. 3. Problemy fitotsenologii [Selected works in 3 volumes. Vol. 3. Problems of phytocenology]. Lavrenko EM, editor. Leningrad: Nauka Publ.; 1975. 542 p. In Russian
30. Mudrov YuV. Merzlotnye yavleniya v kriolitozone ravnin i gor. Osnovnye ponyatiya i opredeleniya. Illyustrirovannyi entsiklopedichskiy spravochnik [Permafrost phenomena in cryolithozone of plains and mountains. Basic concepts and definitions. Illustrated encyclopedic Reference]. Moscow: Nauchnyy Mir Publ.; 2007. 316 p. In Russian
31. Tonkonogov VD. Avtomorfnoe pochvoobrazovanie v tundrovoy i taezhnoy zonakh Vostochno-Evropeyskoy i Zapadno-Sibirskoy ravnin [Automorphic soil formation in the tundra and taiga zones of the East European and West Siberian plains]. Moscow: Pochvennyy in-t im. VV Dokuchaeva Publ.; 2010. 304 p. In Russian
32. Startsev VV, Dymov AA, Prokushkin AS. Soils of postpyrogenic larch stands in Central Siberia: Morphology, physicochemical properties, and specificity of soil organic matter. *Eurasian Soil Science.* 2017;50(8):885-897. doi: [10.7868/S0032180X17080111](https://doi.org/10.7868/S0032180X17080111)
33. Krasnoshchekov YuN. Struktura pochvennogo pokrova gornykh lesov Khenteyskogo nagor'ya v Mongolii [Mountain forest soil cover structure of Khenteisk plateau in Mongolia]. *Vestnik Kras GAU = The Bulletin of KrasGAU.* 2013;12:77-82. In Russian, English Summary
34. Ershov YuI, Moskalev AK, Stepen' RA. Zemel'nye i lesnye resursy Krasnoyarskogo kraya, problemy ikh ratsional'nogo ispol'zovaniya [Land and forest resources of Krasnoyarsk Krai and problems of their rational use]. Novosibirsk: SO RAN Publ.; 2001. 114 p. In Russian
35. *Pochvennoe kartirovanie: uchebno-metodicheskoe posobie* [Soil mapping. A textbook]. Aparin BF and Kasatkina GA, editors. Saint Petersburg: Saint Petersburg State Univ. Publ.; 2012. 128 p. In Russian
36. Ananko TV, Gerasimova MI, Konyushkov DE. The soils of mountainous territories (in the Russian). *Dokuchaev Soil Bulletin.* 2018;92:122-146. doi: [10.19047/0136-1694-2018-92-122-146](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-92-122-146) In Russian
37. Konishchev VN. Formirovanie sostava dispersnykh porod v kriolitosfere [The formation of the dispersed species in cryolithosphere]. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch Publ.; 1981. 197 p. In Russian
38. Raudina TV, Kulizhskiy SP, Spirina VZ. Influence of cryogenic processes on the soil profile formation in the central part of the Tazovskiy peninsula. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya i prirodopol'zovanie = Tyumen State University Herald. Natural Resource Use and Ecology.* 2015;1(1):33-44. In Russian
39. Egli M, Poulenard J. Soils of Mountainous Landscapes. In: *The International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment, and Technology.* Richardson D, Castree N, Goodchild MF, Kobayashi A, Liu W and Marston RA, editors. doi: [10.1002/9781118786352.wbieg0197](https://doi.org/10.1002/9781118786352.wbieg0197)

40. Gentsch N. Landscape controls of organic carbon content and fraction composition in permafrost soils, Central Siberia. *Diploma Thesis*. University Leipzig: Faculty for Physics and Geo Science Institute for Geography; 2010. 105 p.
41. Lupachev AV, Abakumov EV. Soils of Marie Byrd Land, West Antarctica. *Eurasian Soil Science*. 2013;46(10):994-1006. doi: [10.7868/S0032180X13100079](https://doi.org/10.7868/S0032180X13100079)
42. Valtera M, Šamonil P. Soil organic carbon stocks and related soil properties in a primary *Picea abies* (L.) Karst. volcanic-mountain forest. *Catena*. 2018;165:217-227. doi: [10.1016/j.catena.2018.01.034](https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.01.034)
43. Vodyanitskiy YuN, Shoba SA. Disputable issues in interpreting the results of chemical extraction of iron compounds from soils. *Eurasian Soil Science*. 2014;47(6):573-580. doi: [10.7868/S0032180X14060112](https://doi.org/10.7868/S0032180X14060112)
44. Munch JC, Ottow JCG. Preferential reduction of amorphous to crystalline iron oxides by bacterial activity. *Soil Science*. 1980;129:15-21.
45. Babanin VF, Trukhin VI, Karpachevskiy LO, Ivanov AV, Morozov VV. Magnetizm pochv [Magnetism of soils]. Moscow: Yaroslav' Publ., 1995. 222 p. In Russian
46. Roden EE, Zachara JM. Microbial reduction of crystalline Fe (III) oxides: influence of oxide surface area and potential for cell growth. *Environ. Sci. Technol.* 1996;30:1618-1628.
47. Zaboeva IV. Pochvy i zemel'nye resursy Komi ASSR [Soils and land resources of the Komi ASSR]. Syktyvkar: Komi Publ.; 1975. In Russian
48. Lupachev AV, Gubin SV. Suprapermfrost organic-accumulative horizons in the tundra cryozems of northern Yakutia. *Eurasian Soil Science*. 2012;45(1):45-55. doi: [10.1134/S1064229312010115](https://doi.org/10.1134/S1064229312010115)
49. Dutta K, Schuur EAG, Neff JC, Zimov SA. Potential carbon release from permafrost soils of northeastern Siberia. *Glob. Chang. Biol.* 2006;12(12):2336-2351. doi: [10.1111/j.1365-2486.2006.01259.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01259.x)
50. Koven C, Friedlingstein P, Ciais P, Khvorostyanov D, Krinner G, Tarnocai C. On the formation of high-latitude soil carbon stocks: Effects of cryoturbation and insulation by organic matter in a land surface model. *Geophys. Res. Lett.* 2009;36:1-5. doi: [10.1029/2009GL040150](https://doi.org/10.1029/2009GL040150)
51. White DM, Garland DS, Ping CL, Michaelson G. Characterizing soil organic matter quality in arctic soil by cover type and depth. *Cold Reg. Sci. Technol.* 2004;3863-73. doi: [10.1016/j.coldregions.2003.08.001](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2003.08.001)
52. Dymov AA, Zhangurov EV, Hagedorn F. Soil organic matter composition along altitudinal gradients in permafrost affected soils of the Subpolar Ural Mountains. *Catena*. 2015;131:140-148. doi: [10.1016/j.catena.2015.03.020](https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.03.020)
53. Henkner J, Scholten T, Kühn P. Soil organic carbon stocks in permafrost-affected soils in West Greenland. *Geoderma*. 2016;282:147-159. doi: [10.1016/j.geoderma.2016.06.021](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.06.021)

Received 24 June 2019; Revised 13 September 2019;

Accepted 25 September 2019; Published 27 December 2019

Author info:

Startsev Viktor V, Postgraduate student, Department of Soil Science, Federal State Budget Organization of Science Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Division RAS, 28 Kommunisticheskaya Str., Syktyvkar 167000, Russian Federation.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6425-6502>

E-mail: vik.startsev@gmail.com

Dubrovsky Yuri A, Cand. Sci. (Biol.), Researcher, Department of Flora and Vegetation of the North, Federal State Budget Organization of Science Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Division RAS, 28 Kommunisticheskaya Str., Syktyvkar 167000, Russian Federation.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7219-054X>

E-mail: dubrovsky@ib.komisc.ru

Zhangurov Egor V, Cand. Sci. (Agric.), Researcher, Department of Soil Science, Federal State Budget Organization of Science Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Division RAS, 28 Kommunisticheskaya Str., Syktyvkar 167000, Russian Federation.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4297-7536>

E-mail: zhan.e@mail.ru

Dymov Alexey A, Dr. Sci. (Biol.), Leading Researcher, Department of Soil Science, Federal State Budget Organization of Science Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Division RAS, 28 Kommunisticheskaya Str., Syktyvkar 167000, Russian Federation.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1284-082X>

E-mail: aadymov@gmail.com