

ГЕНЕЗИС И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

УДК 631.44

ОСОБЕННОСТИ ПОЧВООБРАЗОВАНИЯ В ДРЕНИРОВАННЫХ ОЗЕРНЫХ КОТЛОВИНАХ БОЛЬШЕЗЕМЕЛЬСКОЙ ТУНДРЫ

© 2023 г. Д. А. Каверин^a, * (ORCID: 0000-0003-2559-2340), С. В. Денева^a (ORCID: 0000-0002-1813-7799),
А. В. Пастухов^a (ORCID: 0000-0001-9368-9270), С. В. Якубенко^b (ORCID: 0000-0000-0000-0000)

^aИнститут биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН,
ул. Коммунистическая, 28, Сыктывкар, 167982 Россия

^bСыктывкарский государственный университет имени Питиримы Сорокина,
Октябрьский пр-т, 55, Сыктывкар, 167001 Россия

*e-mail: dkav@mail.ru

Поступила в редакцию 04.05.2023 г.

После доработки 13.07.2023 г.

Принята к публикации 14.07.2023 г.

Охарактеризованы особенности строения, свойств и температурных режимов почв, функционирующих в двух различных осушенных озерных котловинах Большеземельской тундры. Котловины значительно различаются особенностями ландшафтного развития, составом почвообразующих пород в виде донных отложений и характером почвенно-растительного покрова. В естественно-дренированной котловине, сложенной минеральными (песчаными и глинистыми) донными отложениями, развиты почвы, принадлежащие к отделам глеевые и слаборазвитые, которые характерны для водораздельных ландшафтов региона. Почвы функционируют как мерзлотные экосистемно-модифицированные, частично защищены от протаивания. Профиль почв кислый, ненасыщен основаниями, с умеренным содержанием углерода в минеральных горизонтах. В искусственно-осушенной котловине, покрытой толщей заиленного торфа, сформировались преимущественно торфяные мерзлотные почвы, в том числе уникальные для ландшафтов Большеземельской тундры — торфоземы тундровых луговин. Торфяные мерзлотные почвы котловины являются экосистемно-защищенными, т.е. защищены от протаивания, отличаются высокой зольностью и слабокислой реакцией. Выявлена значительная дифференциация исследуемых параметров почв по котловинам, определяемых составом почвообразующих пород, спецификой развития ландшафтов и проявлениями современных криогенных процессов.

Ключевые слова: осушенные озерные котловины, тундровые почвы, температурные режимы почв, многолетнемерзлые породы

DOI: 10.31857/S0032180X2360083X, **EDN:** DRKEDJ

ВВЕДЕНИЕ

Тундровые термокарстовые озера и дренированные озерные котловины занимают значительные площади в субарктических регионах [27]. Процессы дренирования термокарстовых озерных котловин в криолитозоне происходят непрерывно, что обусловлено действием как ландшафтных, так и климатических факторов [5, 12, 39]. После дренирования в озерных котловинах происходят значительные ландшафтные преобразования, формируются растительный и почвенный покровы, активизируются геоморфологические процессы [31, 34], меняется мерзлотная обстановка [32]. Осушенные термокарстовые котловины постепенно заболачиваются и зарастают кустарниковой растительностью, в них аградируют многолетнемерзлые породы [10, 16]. Формирование растительности и почв происходит в

тесной взаимосвязи с геоморфологическими процессами [24, 37]. Изменение мощности сезонно-талого слоя почв взаимосвязано с пространственной дифференциацией криогенных процессов и механизмом первичных сукцессий [26]. Дренированные термокарстовые котловины содержат значительные запасы почвенного органического вещества в Арктике, исследование которого представляет особый интерес с точки зрения понимания процессов углеродного цикла в условиях климатических изменений [25, 28, 30, 33, 40]. Источником органического вещества служат остатки растений различной степени разложения, которая обычно возрастает с глубиной внутри почвенного профиля [36].

В 1960–1970-е гг. котловины термокарстовых озер искусственно осушали, что было частью советской программы по созданию собственной

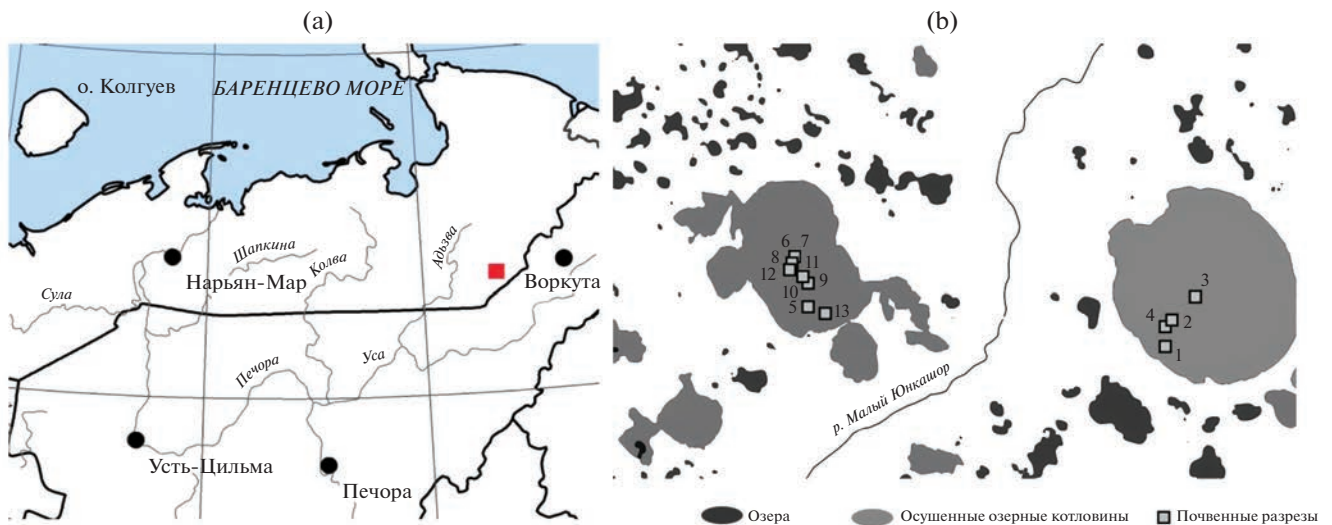


Рис. 1. Географическое положение объектов исследований на уровне: а — региона; б — ландшафта. На карте-схеме а красным прямоугольником обозначен размер таковой б, номера почвенных профилей (разрезов) показаны цифрами.

кормовой базы для крупного рогатого скота в суровых условиях Крайнего Севера [21]. Удобренные и засеянные травами котловины были способны продуцировать высокие укосные урожаи в течение 5–6 лет после их осушения [13]. Однако травянистые сообщества постепенно замещались тундровыми мохово-лишайниковыми и кустарниковыми сообществами, и сельскохозяйственное производство в них прекращалось [22]. В 1970–1980 гг. в рамках данной программы на европейском Севере России было осушено около 40 озер общей площадью 1000 га. Крупнейшим искусственно-осушенным озером стало Опытное, что обусловило его выбор в качестве основного объекта исследований почв. Ранее в контуре осушенного озера Опытное исследовали особенности развития тундровых ландшафтов, формирования структуры почвенного покрова и специфики развития криогенных процессов [6]. Определено, что в первые годы после его осушения произошло охлаждение почвообразующих пород с формированием приповерхностной многолетней мерзлоты [32].

До настоящего времени исследование морфологического строения, физико-химических свойств и температурных режимов почв, сформировавшихся в различных ландшафтных условиях дренированных озерных котловин, остается открытым и требует дальнейших исследований.

Цель работы — определить специфику строения, свойств и температурных режимов почв, сформировавшихся в различных ландшафтных условиях двух дренированных озерных котловин, различающихся по истории развития, составу донных (почвообразующих) пород.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Район исследований расположен в пределах Печорской низменности (юго-восток Большеземельской тундры), в Косью-Роговской низменной равнине. Территория характеризуется субарктическим, умеренно-континентальным умеренно-холодным климатом. Среднегодовая температура воздуха составляет -6°C , средняя температура июля $+12^{\circ}\text{C}$, января -20°C . Среднегодовое количество осадков 600–650 мм, из них около 70% выпадает в теплый период. Зимой преобладают ветры юго-восточного и южного направления. Участки исследований локализованы в урочище Пятимбой-Гладь, находящемся в бассейне р. Бол. Роговая (часть речного бассейна Печоры) (рис. 1). Урочище занимает плоскую слабохолмистую равнинную низменность (145–155 м над ур. м.), покрытую преимущественно плоскобугристыми болотами. Формы рельефа представлены буграми пучения, моренными грядами, террасами озер и ручьев. Территория урочища рассечена долинами ручья Малый Юнкошор и его притоков, ложбинами, полосами стока и озерными котловинами. Разрез четвертичных отложений (сверху–вниз) представлен песками (2–10 м), ленточными глинами (10–40 м), валунными суглинками (40–60 м) с прослоями песка и песчано-гравийных отложений [10]. Торфяные отложения мощностью от 0.5 до 2 м сложены осоково-сфагновыми и сфагново-гипновыми мхами с прослоями кустарниковой и древесной растительности.

Растительность водораздельных террас представлена ерничково-багульниково-мохово-лишайниковыми и осоково-сфагновыми сообществами плоскобугристых болот. В долинах ручьев произрастают ель, береза, ива, красная смородина, жи-



Рис. 2. Фото ландшафтов исследуемых осушенных озерных котловин: а – 1; б – 2.

мошность и другие. Ерниково-мохово-лишайниковые группировки распространены на дренированных надпойменных и озерных террасах. Многолетнемерзлые породы мощностью до 70 м занимают более 90% территории урочища. Их среднегодовая температура находится в диапазоне 0...–2°C [32]. Заозеренность территории 8–12%, озерные котловины имеют размеры от 25 до 1000 м в диаметре, 90% из них заполнены водой, остальные дренированы.

Исследования проводили в контурах двух дренированных озерных котловин, осушенных естественным (1) и искусственным путем (2) соответственно (рис. 2). Котловина естественно-осушенного озера расположена на водораздельной террасе между ручьями Малый и Большой Юнкашор. Котловина дренировалась в 1920-е гг. (устное сообщение Н.Б. Какунова, гидрогеолога (1970–2000 гг.) государственного предприятия “Полярноуралгеология”). Дренаж котловины осуществлялся после формирования проток, соединяющих ее северо-западную часть с притоком ручья Малый Юнкашор. Котловина имеет круглую форму диаметром 1.2–1.3 км, сильно заболочена и покрыта преимущественно крупноивняково-осоковой растительностью. Дно котловины сложено песками и глинами, многолетнемерзлые породы обнаруживаются только в условиях дренированных бугров.

Котловина искусственно осушенного озера Опытное (2) расположена в 3 км к западу от котловины 1 на водораздельной террасе, примыкающей с запада к ручью Малый Юнкашор. Котловина площадью 1.17 км² имеет вытянутую с севера на юг форму длиной 1.7 и шириной 0.7–1.0 км. Осушение озера проведено в 1979 г. гидрогеологами государственного предприятия “Полярноуралгеология” (г. Воркута). Профиль донных отложе-

ний котловины в разрезе представлен слоем поверхностных торфяно-минеральных отложений мощностью 0.5–1.2 м, песками мощностью 2–6 м, ниже которых залегают глины и несортированные, преимущественно суглинистые, моренные отложения мощностью 10–30 м [10]. В настоящее время более половины площади котловины занято многолетнемерзлыми породами (ММП), глубина сезонного протаивания в почвах варьирует от 0.3 до 0.6 м. В котловине сформировались плоскобугристые торфяники с кустарничково-мохово-лишайниковой растительностью, тундровые луговины, заболоченные мочажины с осоковыми и ивняковыми сообществами [32].

Полевые исследования почвенного покрова проводили в вегетационные сезоны 2011 и 2014, 2015 и 2017 гг. В пределах обеих котловин под наблюдением находилось тринадцать участков (четыре – в котловине 1 и девять – в котловине 2) (табл. 1). На каждом участке проведено морфологическое описание почвенных разрезов, описание растительности, ландшафтной обстановки и криогенных процессов. В сезонно-талой части профиля произведен отбор образцов почвенных горизонтов, в подстилающих ММП – отбор мерзлых кернов до глубины 1 м. Таксономические названия почв в статье приведены в соответствии с классификацией и диагностикой почв России [11]. Приведена корреляция наименований почв с системой мировой базы почвенных ресурсов [29].

Измерения температуры почв выполняли цифровыми логгерами Onset Hobo U-12-008 с присоединенными к ним четырьмя датчиками, установленными на поверхности почвы и глубинах 20, 50 и 100 см. По одному логгеру установили в двух почвах, наиболее специфичных для каждой из котловин. Объем временной выборки составил 5700 значений для каждой из глубин, где прово-

Таблица 1. Объекты исследований

Номер участка	Элемент ландшафта	Растительность	Почва (подтип; строение профиля; глубина горизонтов, см)	Глубина ММП, см	Криогенные признаки
Котловина 1					
1	Тундры на минеральных буграх	Ерничково-ивняково-кустарничково-лишайниковая	Псаммозем слоистый глееватый (Gleyic Albic Stagnosol Arenic Fluvis): Oao (0–3)–C ₁ (3–26)–C ₂ (26–60)–C ₃ (60–80)	>100	Бугорковатые и бугристые образования, связанные с процессами пучения. Высота бугров 100 см
2		Ерничково-ивняковая травянисто-лишайниково-моховая	Торфяно-глеезем потечно-гумусовый мерзлотный (Histic Cryosol Siltic Humic): T (0–11)–Bg _{hi} (11–20)–G (20–50)–G ₁ (50–60)	50	
3		Луговины с вейником пурпурным (<i>Calamagrostis purpurea</i>)	Торфяно-глеезем мерзлотный (Histic Cryosol Siltic Humic): O (0–2)–T (2–16)–G ₁ (16–30)–G ₂ (30–45)–G ₃ (45–55)	45	
4		Заболоченные участки	Хвоцево-сабельниковая луговина	Торфяно-глеезем иловато-перегнойный (Histic Gleysol Siltic Humic): T _{mr} (0–13)–G (13–40)	
Котловина 2					
5	Тундры на торфяных буграх	Кустарничково-мохово-лишайниковая	Торфозем минерально-торфяный мерзлотный (Cryic Sapric Histosol Limnic): PT (0–30)–PT _{1mr} (30–52)–PT _{2mr} (52–60)–TT _{mr} (60–75)–G ₁ (75–100)	60	Морозобойное растрескивание. Трещины глубиной до 50 см и шириной 20 см на торфяном бугре высотой 100 см
6		Оголенные пятна на торфяном бугре	Торфозем деструктивный мерзлотный (Cryic Sapric Histosol Turbic Limnic): PT _{md} (0–5)–PT ₁ (5–20)–PT ₂ (20–50)–G _{hi} (50–65)–G ₁ (65–80)–G ₂ (80–95)	50	Признаки криогенного пучения, морозобойное растрескивание. Высота бугров 100 см
7		Пятно, заросшее кустистыми лишайниками и покрытое криптогамными корочками, на торфяном бугре	Торфозем минерально-орфяный мерзлотный (Cryic Sapric Histosol Turbic Limnic): O (0–2)–PT _{mr} (2–17)–PT ₁ (17–32)–PT ₂ (32–51)–PT _{mr} (51–68)–TT _{mr} (68–74)	68	

Таблица 1. Окончание

Номер участка	Элемент ландшафта	Растительность	Почва (подтип; строение профиля; глубина горизонтов, см)	Глубина ММП, см	Криогенные признаки
8	Луговины на торфяных буграх	Вейниково-моховая луговина	Торфозем минерально-торфяной гумусово-стратифицированный мерзлотный (Cryic Sapric Histosol Limnic): PT_{1rh} (0–5)– PT_{2rh} (5–30)– PT_{mr} (30–40)– TT_{1mrL} (40–65)– TT_{2mrL} (65–80)– TT_{3mrL} (80–92)– GL (92–105)	40	Приподнятая на 60–70 см поверхность луговины над основной поверхностью дна котловины
9		Вейниково-моховая луговина	Торфозем минерально-торфяной гумусово-стратифицированный мерзлотный (Cryic Sapric Histosol Limnic): PT_{1rh} (0–9)– PT_{2rh} (9–30)– PT_{mr} (30–51)– TT_{mrL} (51–60)	51	
10		Вейниково-моховая луговина	Торфозем минерально-торфяной гумусово-стратифицированный мерзлотный (Cryic Sapric Histosol Limnic): PT_{1rh} (0–3)– PT_{2rh} (3–20)– PT_{1mr} (20–34)– PT_{2mr} (34–45)– TT_{mrL} (45–50)	45	
11	Заболоченные участки	Осоково-моховая мочажина	Перегнойно-глеявая иловато-перегнойная (Cryic Sapric Histosol Limnic): H_{1mr} (0–10)– H_{2mr} (10–30)– H_{3mr} (30–60)– $CGhiL$ (60–70)	60	–
12		Закочкаренная злаково-осоковая мочажина с окнами открытой воды	Перегнойно-глеявая иловато-перегнойная (Cryic Sapric Histosol Limnic): H_{1mr} (0–17)– PT (17–31)– H_{2mr} (31–40)	–	–
13	Пойма ручья в котловине	Ивняково-травянистая	Аллювиальная гумусовая глеевая грубогумусированная (Gleyic Fluvisol Arenic): $AYao$ (0–5)– AY (5–20)– G (20–35)– CG^{++} (35–50)	–	–

дили измерения температуры. Для анализа температурных режимов рассчитаны значения N -факторов, как отношение сумм температур $> 0^\circ\text{C}$ в почве к аналогичным суммам в воздухе за тот же период [35]. Физико-химические анализы проведены в аккредитованной экоаналитической лаборатории Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Водный и солевой pH определены потенциометрически со стеклянным и проточным хлорсеребряным электродами; гидролитическая кислотность — вытеснением NH_4Cl с последующим атомно-абсорбционным определением на Hitachi 180-60, гранулометрический состав — по Качинскому с диспергацией и кипячением в присутствии NaOH ; содержания обменных катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} — методом атомной абсорбции с экстракцией 1 М KCl . Определение гигроскопической влажности проведено с помощью метода просушивания образца при температуре 105°C до постоянной массы (7 ч), потерю при прокаливании — при температуре 550°C . Вычисление общего содержания минеральных веществ в почве (для минеральных горизонтов — прокаленный остаток, для органогенных — зольность) определено по формуле:

$$\text{ПП} = 100 - \text{ППП}, \quad (1)$$

где ПП — прокаленный остаток или зольность, %; ППП — потери при прокаливании [20].

Дендрограмму сходства объектов строили методом взвешенного среднего. В качестве меры различия применяли евклидово расстояние ($E.d.$).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Морфологическое строение почв. Строение и свойства почв полностью определяются особенностями литологии донных отложений обеих котловин. Гранулометрический состав значительно различается между почвенными профилями (табл. 2). В естественно-осушенной котловине 1 с глинистыми донными отложениями (преобладают мелкопылеватая и илистая фракции) формируются торфяно-глеевые (в том числе мерзлотные). Мощность органогенного горизонта в них варьирует от 10 до 20 см, ниже залегают глеевые глинистые горизонты сизо-бурой окраски с творожистой структурой. На дренированных буграх, сложенных песчано-супесчаными почвообразующими породами, формируются псаммоземы. В морфологическом строении псаммоземов мощность верхнего органогенного горизонта, как правило, не превышает 5 см. Ниже залегает слоистая толща песчаных горизонтов, где тонкие прослойки серой окраски чередуются с сизовато-желтыми слоями со следами сегрегации железа (мелкими охристыми пятнами, примазками, конкрециями).

В котловине 2 с торфяно-минеральными донными отложениями сформировались торфоземы, перегнойно-глеевые и аллювиальные почвы. Плоские торфяные бугры, подстилаемые ММП, занимают около 6% от общей площади котловины. На торфяных буграх под кустарничково-мохово-лишайниковой растительностью сформировались торфоземы минерально-торфяные мерзлотные, под оголенными торфяными пятнами — торфоземы деструктивные мерзлотные. Торфоземы сложены хорошо разложившимся слоистым заиленным торфом, общая мощность почвенного профиля обычно совпадает с таковой сезонно-талого слоя. Торфяные горизонты подстилаются многолетнемерзлыми оглееными опесчаненными средними суглинками сизой окраски, пропитанными в верхней части подвижным органическим веществом, с массивными криогенными текстурами. В котловине 2 широко распространены тундровые луговины [32], где функционируют торфоземы мерзлотные минерально-торфяные с гумусово-стратифицированным горизонтом в верхней части и травянисто-моховым очесом на поверхности. Присутствие гумусово-стратифицированных горизонтов объясняется накоплением илистого материала в торфяно-минеральных отложениях в период нахождения их под водой (до 1979 г.). Торфяные горизонты подобны таковым торфоземам на буграх.

На заболоченных участках, под травянистой и крупнокустарниковой растительностью, сформировались перегнойно-глеевые почвы. Верхняя часть их представлена смесью сильно разложившихся растительных остатков, густо переплетенных корнями растений, ниже залегают заиленные иловато-перегнойные горизонты.

Аллювиальные гумусовые глеевые почвы сформировались в узкой пойме ручья, пересекающего западную часть котловины 2. Они развиты под ивняково-травянистыми растительными сообществами. Вверху профиля серогумусовый горизонт мощностью около 20 см, содержащий грубогумусовый материал, который подстилается слоистыми, с разной степенью выраженности оглеения, супесчаными горизонтами. На заболоченных участках и в пойме ручья кровля многолетнемерзлых пород в пределах 2 м от поверхности почв не обнаруживается.

Температурный режим почв. В котловине 1 температурный режим почв охарактеризован на примере псаммозема (разрез 1), сформированного на песчано-супесчаном бугре, в котловине 2 — торфозема мерзлотного на торфяном бугре (разрез 6). По зимним температурам профиль псаммозема холоднее, осредненные за период исследований суммы отрицательных температур почв (СОТп) выше по сравнению с торфяной почвой в 2.2 раза (табл. 3). В пределах глубин 0–50 см средняя про-

Таблица 2. Гранулометрический состав почв

№ разреза	Тип почвы	Горизонт	Глубина, см	Содержание фракций, %; размер частиц, мм						Сумма частиц >0.01	Сумма частиц <0.01
				1–0.25	0.25–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.001	<0.001		
1	Псаммозем слоистый глееватый	C1 ¹ ...g	3–26	10	79	3	2	0	7	91	9
		C2 ¹ ...g	26–36	8	81	3	3	0	4	92	8
		C2 ² ...g	45–55	18	71	3	4	1	3	93	7
		C ³ ...G	70–80	6	70	12	4	1	7	88	12
2	Торфяно-глеезем потечно-гумусовый мерзлотный	Bghi	11–20	2	7	19	17	33	23	27	73
		G	30–40	3	7	26	14	29	21	36	64
3	Торфяно-глеезем мерзлотный	G1	20–30	1	9	17	13	31	30	26	74
		G2	35–45	1	6	20	15	35	23	27	73
4	Торфяно-глеезем иловатого-перегнойный	G	30–40	0	9	7	16	24	42	17	83
		G _L	90–100	18	51	12	1	1	17	81	19
6	Торфозем минерально-торфяной мерзлотный	Ghi _L	50–60	18	24	28	7	6	17	70	30
		G1 _L	65–75	14	25	28	7	7	19	67	33
		G2 _L	85–95	3	36	30	8	2	20	69	31
8	Торфозем минерально-торфяной гумусово-стратифицированный мерзлотный	G _L	95–105	11	40	17	6	2	25	67	33
		G	25–35	34	48	5	2	2	9	87	13
13	Аллювиальная гумусовая глеевая грубогумусированная	CG ²	35–45	30	55	4	0	2	8	90	10

Таблица 3. Температурный режим почв

Гидрологические годы	Температурный параметр	Глубина, см			
		0	20	50	100
Котловина 1 (Профиль 1)					
2007–2008	СОТп, °С сут	–1173	–956	–805	–448
	СПТп, °С сут	1257	853	514	183
	$T_{\text{год}}$, °С	0.2	–0.3	–0.8	–0.7
	S	8.4	6.3	4.7	2.3
	N-фактор зимний	0.51	0.41	0.35	–
	N-фактор летний	1.12	0.76	0.46	–
2008–2009	СОТп, °С сут	–1267	–1069	–929	–544
	СПТп, °С сут	1698	1149	692	247
	$T_{\text{год}}$, °С	1.1	0.2	–0.6	–0.8
	S	9.1	7.0	5.2	2.7
	N-фактор зимний	0.49	0.41	0.36	–
	N-фактор летний	1.62	1.10	0.66	–
2009–2010	СОТп, °С сут	–1838	–1574	–1378	–
	СПТп, °С сут	1231	836	520	–
	$T_{\text{год}}$, °С	–1.7	–2.0	–2.4	–
	S	10.0	8.0	6.4	–
	N-фактор зимний	0.52	0.44	0.39	–
	N-фактор летний	1.24	0.84	0.52	–
Котловина 2 (Профиль 6)					
2014–2015	СОТп, °С сут	–739	–486	–252	–187
	СПТп, °С сут	1376	727	130	0
	$T_{\text{год}}$, °С	1.7	0.7	–0.3	–0.5
	S	7.3	4.3	1.4	0.4
	N-фактор зимний	0.29	0.19	0.10	–
	N-фактор летний	1.16	0.61	0.11	–
2015–2016	СОТп, °С сут	–693	–366	–138	–97
	СПТп, °С сут	1860	1140	363	0
	$T_{\text{год}}$, °С	3.2	2.1	0.6	–0.3
	S	9.2	5.9	2.2	0.1
	N-фактор зимний	0.34	0.18	0.07	–
	N-фактор летний	1.14	0.70	0.22	–
2016–2017	СОТп, °С сут	–1465	–604	–248	–86
	СПТп, °С сут	1556	1042	345	0
	$T_{\text{год}}$, °С	0.3	1.2	0.3	–0.2
	S	10.7	6.2	2.4	0.2
	N-фактор зимний	0.51	0.21	0.09	–
	N-фактор летний	1.56	1.04	0.34	–

Примечание. СОТп – сумма отрицательных температур почв; СПТп – сумма положительных температур почв; $T_{\text{год}}$ – среднегодовая температура почвы; S – стандартное отклонение температуры почвы. Зимние и летние N-факторы рассчитаны как отношение сумм температур $>$ или $<0^{\circ}\text{C}$ в почве к аналогичным суммам в воздухе за тот же период.

должительность периодов с отрицательными температурами почв в псаммоземе меньше (200 ± 14 дней), чем в торфоземе (233 ± 7 дня). Наибольшие различия в сезонном охлаждении наблюдаются на глубине 100 см. Значения СОТп, наблюдаемые в течение 190 дней в песчаной почве, достигают 500 градусо-суток ($^{\circ}\text{C}$ сут) и более. В торфоземе, где отрицательные температуры на глубине 100 см наблюдаются в течение всего года, они в несколько раз ниже. В профиле торфозема отмечено резкое снижение (в 4–17 раз) значений СОТп с глубиной, тогда как в псаммоземе суммы отрицательных температур на глубине 100 см в 2.5 раза меньше таковых поверхности.

По суммам положительных температур (СПТп) профиль псаммозема в среднем теплее мерзлотного торфозема на 123°C сут. В пределах глубин 0–50 см в песчаной почве продолжительность периода положительных температур выше (140 ± 5 дней) по сравнению с таковым торфяной (129 ± 7 дня). Однако поверхность торфозема теплее ($1597 \pm 141^{\circ}\text{C}$ сут), чем у псаммозема ($1395 \pm 151^{\circ}\text{C}$ сут), что связано с отсутствием сплошного мохово-лишайникового покрова и низким альбедо торфа. На глубине 20 см значения СОТп в обоих профилях в целом схожи (945 ± 102 и $970 \pm 124^{\circ}\text{C}$ сут соответственно). Песчаная почва прогревается больше, больше и глубже. На глубине 50 см в псаммоземе суммы положительных температур в 2 раза выше таковой торфяной почвы. На глубине 100 см в торфоземе залегают многолетнемерзлые горизонты, а в псаммоземе летом наблюдаются положительные температуры. Среднегодовые температуры почв сильно варьируют в зависимости от метеорологических условий года.

По годовым параметрам профиль торфозема теплее, чем псаммозема. Это объясняется большим охлаждением песчаных горизонтов профиля 1 зимой. Суммы отрицательных температур на глубине 100 см в псаммоземе превышают значения СПТп, более чем на 250°C сут. Скорость затухания сезонных колебаний температуры почв оценена на основе изменений их стандартных отклонений (S) на разных глубинах. Значения S температур на поверхности двух почв близки. В псаммоземе значения стандартных отклонений на глубине 20 см в среднем на 1.7 больше, чем в торфоземе, на глубине 50 см — на 3.4, на 100 см — 2.3.

Учитывая, что мониторинговые температурные измерения в разных профилях выполняли в разные годы, рассчитаны значения N-факторов, позволяющие сравнить степень нагрева/охлаждения почв в слое 0–50 см вне зависимости от метеорологических параметров отдельных лет. Обычно N-фактор рассчитывается для поверхности почв, однако отношение суммы температур почвы на глубине 20 см к таковой воздуха приво-

дится в классификационной системе Димо [4]. Кроме того, температурные данные с глубины 50 см наиболее эффективно отражают влияние ландшафтных условий в регионе [15]. Значения зимних N-факторов в псаммоземе превышают таковые в торфоземе, при этом различия увеличиваются с глубиной. Это объясняется большим охлаждением сезонномерзлого слоя псаммозема. Средние значения летних N-факторов на поверхности почв с профилями 1 и 6 одинаковы: 1.3 ± 0.2 и 1.3 ± 0.1 соответственно, а на глубинах 20 и 50 см данные значения в псаммоземе превышают таковые торфозема. Это обусловлено резким снижением сумм положительных температур от поверхности почвы к близко залегающей кровле ММП в торфоземе.

Физико-химические свойства почв. Максимальными средними по профилю значениями гигроскопической влажности характеризуются торфоземы котловины 2, тогда как минимальные отмечены в псаммоземе (разрез 1). Во всех исследованных почвах преобладает высокозольный (эутрофный) сильнозаиленный торф. Олиготрофный и мезотрофный торф выявлен только в верхних органогенных горизонтах почв обеих котловин (разрезы 2, 6). В котловине 2 средняя зольность торфяных горизонтов торфоземов бугров составляет $40 \pm 8\%$, торфоземов луговин — $51 \pm 3\%$, перегнойно-глеевых почв — $47 \pm 8\%$.

Почвы котловины 1 более кислые, средняя величина $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ и pH_{KCl} составила 5.1 ± 0.1 и 4.0 ± 0.1 соответственно. В котловине 2 полученные данные представлены следующими показателями: 5.3 ± 0.1 и 4.6 ± 0.1 соответственно. Кислотность почв снижается с глубиной. Наиболее низкие значения pH (до 3) выявлены в верхних торфяных горизонтах почв минеральной котловины. Наибольшие показатели pH определены в органо-минеральных и минеральных глеевых многолетнемерзлых горизонтах, подстилающих торфяные в торфоземах озера 2 (табл. 4). Исследуемые почвы обладают высокой актуальной кислотностью (pH_{KCl} менее 5.0), что, видимо, связано с крайне медленным развитием биологических процессов на Севере и промывным водным режимом; при этом не происходит полной нейтрализации кислых продуктов разложения растительных остатков. Средние значения гидролитической кислотности почв котловины 1 заметно ниже (23 ± 6 смоль(экв)/кг) в сравнении с таковыми котловины 2 (31 ± 2 смоль(экв)/кг). Наибольшие значения гидролитической кислотности выявлены в торфоземах под тундровой растительностью бугров (профили 5–7), наименьшие — в минеральных почвах (псаммоземе и аллювиальной). Более контрастные различия среди почв сравниваемых котловин наблюдаются между показателями по обменной кислотности. Средние значения $\text{H} + \text{Al}$ (смоль(экв)/кг) в

почвах котловины 1 составили 6.5 ± 2.0 , в котловине 2 — 1.1 ± 0.1 . Наибольшими величинами обменной кислотности характеризуются поверхностные органогенные горизонты почв котловины 1. В этом направлении закономерно и меняется состав катионов, обуславливающих обменную кислотность. В котловине 1 преобладает H^+ над Al^{3+} , в то время как в котловине 2 обменный алюминий значительно превалирует над H^+ . Особенно это характерно для органогенных горизонтов. Исключение составляет заболоченная хвощево-сabelниковая луговина с торфяно-глееземом иловато-перегнойным (котловина 1), где содержание Al^{3+} превосходит содержание H^+ .

Значительная дифференциация между профилями обеих котловин выражена и по сумме обменных оснований. Высокие значения Ca^{2+} и Mg^{2+} отмечены в полугидроморфных почвах котловины 1 и криогидроморфных котловины 2. Минимальные количества поглощенных оснований выявлены в минеральных автоморфных профилях: псаммоземе и аллювиальной почве. Все рассматриваемые почвы характеризуются низкой и средней степенью насыщенности основаниями (V). Для почв котловины 1 присущи большие значения ($V = 53 \pm 5\%$). В котловине 2 торфяные горизонты торфоземов менее насыщены основаниями ($44 \pm 1\%$), но подстилающие их многолетнемерзлые глеевые горизонты характеризуются максимумом по данному показателю (60–70%). В целом минеральные горизонты почв обеих котловин имеют большие значения степени насыщенности основаниями по сравнению с органогенными.

Содержание углерода и азота в почвах полностью определяется различиями по составу донных отложений бывших озер. Наибольшее содержание почвенного углерода ($30 \pm 4\%$) характерно для торфоземов, функционирующих под мохово-кустарничковой растительностью бугров. Меньше углерода ($22 \pm 2\%$) содержат торфоземы луговин и перегнойно-глеевые почвы ($25 \pm 5\%$) котловины 2. В минеральных горизонтах полугидроморфных почв котловины 1 количество C колеблется в пределах 5.0–6.6%. В глеевых многолетнемерзлых горизонтах (котловина 2) содержание углерода не превышает 4%. Минимальное содержание C определено в минеральных горизонтах слабообогатившей и пойменной почв.

Гумус исследованных почв относительно слабо обогащен азотом. Диапазон соотношений C/N находится в пределах 16–19 для органогенных и 11–14 — для минеральных мерзлотных горизонтов торфоземов (котловина 2). Значительных различий по C/N между почвами котловины 1 (18 ± 2) и 2 (16 ± 1) не наблюдается. Минимальные значения соотношения обнаруживаются в аллювиальной гумусовой глеевой грубогумусированной почве (профиль 13).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Характерные для котловины 1 торфяно-глееземы широко распространены в экотонной тундрово-таежной полосе европейского северо-востока России [17]. Псаммоземы в регионе занимают менее 1% территории, характерны для дренированных песчаных массивов и надпойменных террас [11, 14, 17]. В котловине 1 псаммоземы развиты на ее окраине, что, очевидно, связано с эрозией окружающей озерной террасы, сложенной песками [10]. Глинистый состав донных отложений, на которых сформировались торфяно-глееземы, характерен для озерных котловин территорий, ранее покрытых ледником [19]. Почвы котловины 2, напротив, являются относительно редкими и уникальными для Большеземельской тундры. Торфоземы тундровых луговин в регионе ранее не описывались и не исследовались. Особенности морфологического строения торфоземов обусловлены современной спецификой криогенных процессов и сукцессионного развития растительных сообществ на мощных органо-минеральных отложениях [6]. По морфологическому строению торфоземы бугров котловины 2 наиболее близки к торфяным мерзлотным почвам плоскобугристых болот.

Сравнительный анализ показал, что температурный режим исследованного псаммозема наиболее схож с почвами песчаных озерных террас [8]. Мерзлотные почвы легкого гранулометрического состава характеризуются значительным прогреванием в летний период и охлаждением зимой. В песчаной почве температурные колебания с глубиной затухают медленнее, что обусловлено повышенной теплопроводностью почв как в зимний, так и летний периоды [1, 2]. Согласно предложенной температурно-мерзлотной компоненте [9], профиль псаммозема классифицируется как холодный (среднегодовая температура на 50 см $-2...0^\circ C$) среднеглубинный мерзлотный (ММП 1–2 м) со среднеглубинным сезонным промерзанием (1–2 м). По классификации генезиса ММП [38] псаммозем может быть отнесен к климатически обусловленным мерзлотным почвам.

В котловине 1 формирование близко залегающих (до 1 м) многолетнемерзлых пород, подстилающих почвы, очевидно, постепенно произошло на менее обводненных участках с глинистыми глеевыми почвами, в которых сформировался верхний торфяной горизонт. Мерзлотные глинистые почвы котловины 1 функционируют как климатически-обусловленные экосистемно-модифицированные [38]. Многолетняя мерзлота в этих почвах сформировалась в условиях относительно холодного климата, ее дальнейшее сохранение стало возможным по мере формирования поверхностного органогенного горизонта. Триг-

Таблица 4. Физико-химические свойства почв

Номер разреза	Горизонт	Глубина, см	Гигроскопическая влажность, %	Коэффициент гигроскопической влажности, %	Зольность, %	pH		Нг, смоль(экв)/ кг почвы	Обменная кислотность, смоль(экв)/кг				Обменные катионы, смоль(экв)/кг		Ca+Mg, смоль(экв)/кг	Степень насыщенности основаниями, %	C, %	N, %	C/N	H
						H ₂ O	KCl		H + Al	H	Al	Ca ²⁺	Mg ²⁺							
Котловина 1																				
1	Oao	0–3	6.30	1.07	27	4.4	3.2	60.2	18.27	6.00	12.27	14.2	3.7	17.9	23	38.4	1.27	30	–	–
	C ₁ ~ ~ g	5–20	0.44	1.00	99	5.0	3.7	2.92	1.51	0.20	1.31	1.7	0.8	2.5	47	0.3	0.02	10	–	–
	C ₂ ~ ~ g	25–35	0.49	1.00	99	5.3	3.9	1.98	0.63	0.20	0.43	2.3	0.9	3.2	62	0.2	0.02	11	–	–
	C ₂ ~ ~ g	45–55	0.40	1.00	99	5.5	4.1	1.34	0.17	0.05	0.12	2.1	0.8	2.9	69	0.2	0.01	12	–	–
	C ~ ~ G	70–80	0.66	1.01	98	5.3	4.4	1.98	0.17	0.08	0.09	3.4	1.1	4.5	70	0.5	0.03	15	–	–
2	T	0–10	8.83	1.10	4	4.0	2.9	67.4	22.93	20.93	2.00	14.7	5.6	20.3	23	34.9	1.01	35	–	–
	Bghi	11–20	3.83	1.04	86	5.1	3.8	13.1	5.29	1.69	3.60	11.5	5.8	17.3	57	5.7	0.37	15	–	–
	G	30–40	3.43	1.04	85	5.2	4.1	11.7	3.93	3.67	0.27	17.5	6.7	24.2	67	6.3	0.40	16	–	–
3	O	0–2	8.66	1.09	9	5.2	4.3	51.4	9.47	8.40	1.07	26.2	11.7	37.9	42	41.6	2.4	17	–	–
	T	5–15	8.11	1.09	36	5.0	4.1	43.9	10.40	8.40	2.00	25.6	7.2	32.8	43	30.1	1.9	16	–	–
	G ₁	20–30	3.01	1.03	88	5.3	4.1	10.3	1.75	0.87	0.88	12.9	6.8	19.7	66	5.0	0.31	16	–	–
	G ₂	35–45	3.22	1.03	85	5.5	4.3	10.1	0.69	0.68	0.01	17.3	7.3	24.5	71	6.6	0.40	17	–	–
4	Tmr	0–20	8.53	1.09	25	5.2	4.4	43.9	10.00	8.00	2.00	34.4	13.6	48.0	52	33.3	1.06	31	–	–
	G	30–40	3.29	1.03	87	5.7	4.8	6.69	–	–	–	–	–	–	–	5.5	0.34	16	–	–
Котловина 2																				
5	PT	0–30	3.82	1.04	70	4.9	3.8	41.4	3.67	0.17	3.50	12.6	2.1	14.7	26	14.9	0.86	17	2.1	–
	PT ₁ mr	30–52	5.89	1.06	48	5.4	4.6	40.2	0.67	0.17	0.50	30.6	5.5	36.2	47	28.6	1.49	19	4	–
	TE ₂ mr	52–60	3.49	1.04	72	5.6	4.7	26.2	0.67	0.17	0.50	21.7	4.1	25.8	50	11.2	0.69	16	1.7	–
	TTmrL	60–75	3.07	1.03	74	6.0	5.2	24.4	0.67	0.17	0.50	24.0	4.8	28.8	54	16.5	1.26	13	2.3	–
	GL	90–100	1.30	1.01	92	5.3	4.8	6.53	0.33	0.05	0.28	10.6	2.1	12.7	66	3.8	0.28	14	0.4	–

Таблица 4. Продолжение

Номер разреза	Горизонт	Глубина, см	Литоскопическая влажность, %	Коэффициент гигроскопической влажности, %	Зольность, %	pH		Нг, смоль(экв)/ кг почвы	Обменная кислотность, смоль(экв)/кг			Обменные катионы, смоль(экв)/кг		Ca+Mg, смоль(экв)/кг	Степень насыщенности основаниями, %	C, %	N, %	C/N	H	
						H ₂ O	KCl		H + Al	H	Al	Ca ²⁺	Mg ²⁺							
6	PTmd	0–5	5.51	1.06	32	4.4		4.1	50.3	2.50	0.50	2.00	22.5	4.5	26.9	35	39.8	2.2	18	5.5
	PT ₁	5–20	8.16	1.09	10	5.0		4.3	52.6	1.83	0.33	1.50	44.1	5.8	49.9	49	50.1	2.90	17	6.6
	PT ₂	20–50	9.90	1.11	8	5.3		4.6	65.5	1.17	0.33	0.83	73.9	8.6	82.5	56	47.9	2.94	16	6.0
	GhiL	50–65	2.26	1.02	85	5.4		4.6	8.45	0.47	0.12	0.35	2.8	0.7	3.5	29	8.0	0.67	12	<2.0
	G ₁ L	65–80	1.84	1.02	90	5.7		4.7	5.98	0.53	0.13	0.40	11.8	3.0	14.7	71	4.0	0.36	11	2.0
	G ₂ L	80–95	1.37	1.01	95	5.7		4.7	4.32	0.63	0.08	0.55	8.5	2.4	11.0	72	1.56	0.14	11	<2.0
7	O	0–2	3.27	1.03	60	4.5		4.3	38.4	2.31	0.17	2.15	7.1	1.4	8.5	18	18.4	1.03	18	–
	PTmr	2–17	5.49	1.06	33	4.6		4.2	52.6	2.64	0.33	2.31	21.0	1.7	22.8	30	38.2	2.07	18	–
	PT ₁ mr	17–32	7.08	1.08	21	4.9		4.5	53.8	0.83	0.33	0.50	33.2	3.8	37.1	41	42.4	2.37	18	–
	PT ₂ mr	32–51	7.67	1.08	17	5.0		4.7	53.8	0.50	0.17	0.33	38.4	5.8	44.2	45	41.6	2.54	16	–
	PTmr	51–68	4.32	1.05	63	5.0		4.8	32.1	0.33	0.17	0.17	27.3	5.2	32.4	50	17.3	1.24	14	–
	TTmrL	68–74	3.94	1.04	63	5.6		5.3	25.6	0.33	0.17	0.17	27.4	5.5	32.9	56	17.7	1.22	15	–
8	PT ₁ rh	0–5	6.58	1.07	19	5.7		4.8	33.5	2.67	1.00	1.67	24.2	7.4	31.6	49	25.4	1.6	16	3.7
	PT ₂ rh	5–30	4.39	1.05	65	5.4		4.2	35.9	1.83	0.17	1.67	17.7	3.1	20.8	37	18.9	1.14	17	2.9
	PTmr	30–40	4.84	1.05	59	5.3		4.3	38.4	1.33	0.17	1.17	21.5	3.8	25.3	40	21.6	1.18	18	3.2
	TT ₁ mrL	40–65	4.02	1.04	64	5.4		4.4	32.8	1.17	0.17	1.00	20.5	3.5	24.0	42	16.9	0.93	18	2.5
	TT ₂ mrL	65–80	4.45	1.05	54	5.4		4.5	33.5	1.17	0.17	1.00	26.6	4.1	30.7	48	27.4	1.42	19	3.9
	TT ₃ mrL	80–92	5.12	1.05	53	5.6		4.6	27.4	1.33	0.17	1.17	35.1	6.2	41.3	60	27.1	1.35	20	3.8
9	G ₁ L	95–105	1.88	1.02	86	5.3		4.4	6.25	0.53	0.12	0.42	10.1	2.3	12.3	66	4.0	0.29	14	<2.0
	PT ₁ rh	0–9	6.16	1.07	25	5.3		4.9	35.9	1.16	0.50	0.66	19.7	9.1	28.8	44	28.8	1.69	17	–
	PT ₂ rh	9–30	3.58	1.04	65	5.1		4.7	29.9	0.83	0.17	0.66	16.9	4.7	21.6	42	13.3	0.77	17	–
	PTmr	30–51	5.02	1.05	46	5.3		4.8	37.5	0.66	0.00	0.66	26.7	6.0	32.6	47	25.3	1.31	19	–
	TTmrL	51–60	4.63	1.05	50	5.5		4.9	35.1	0.50	0.00	0.50	26.8	5.7	32.5	48	24.4	1.29	19	–

Таблица 4. Окончание

Номер разреза	Горизонт	Глубина, см	Гигроскопическая влажность, %	Коэффициент гигроскопической влажности, %	Зольность, %	pH		Нг, смоль(экв)/ кг почвы	Обменная кислотность, смоль(экв)/кг				Обменные катионы, смоль(экв)/кг		Ca+Mg, смоль(экв)/кг	Степень насыщенности основаниями, %	C, %	N, %	C/N	H
						H ₂ O	KCl													
10	PT ₁ rh	0–3	4.90	1.05	42	5.0	4.6	37.5	1.32	0.17	1.16	18.0	Ca ²⁺	Mg ²⁺	24.0	39	25.5	1.56	16	–
	PT ₂ rh	3–20	4.37	1.05	53	4.8	4.3	40.2	2.15	0.17	1.98	20.8	Ca ²⁺	Mg ²⁺	25.5	39	21.4	1.27	17	–
	PT ₁ mr	20–34	4.14	1.04	61	4.9	4.5	35.1	1.49	0.17	1.32	18.9	Ca ²⁺	Mg ²⁺	23.5	40	17.0	0.99	17	–
	PT ₂ mr	34–45	4.56	1.05	54	5.0	4.7	35.9	0.50	0.33	0.17	23.3	Ca ²⁺	Mg ²⁺	29.6	45	20.9	1.16	18	–
	TTmrL	45–50	4.73	1.05	52	5.2	4.8	33.5	0.33	0.00	0.33	24.9	Ca ²⁺	Mg ²⁺	31.8	49	24.0	1.29	19	–
11	H ₁ mr	0–10	4.98	1.05	47	5.4	4.4	43.9	1.33	0.17	1.17	22.6	Ca ²⁺	Mg ²⁺	28.1	39	29.4	1.58	19	4.1
	H ₂ mr	10–30	4.98	1.05	56	5.5	4.4	35.9	1.33	0.17	1.17	20.7	Ca ²⁺	Mg ²⁺	25.3	41	24.7	1.34	18	3.7
	H ₃ mr	30–50	5.06	1.05	58	5.4	4.4	36.7	1.17	0.17	1.00	21.2	Ca ²⁺	Mg ²⁺	25.8	41	24.2	1.30	19	3.5
12	H ₁ mr	0–17	3.54	1.04	68	5.3	4.9	25.0	0.33	0.00	0.33	17.1	Ca ²⁺	Mg ²⁺	21.4	46	3.4	0.76	4	–
	PT	17–31	6.36	1.07	10	5.8	5.5	26.2	0.33	0.33	0.00	22.5	Ca ²⁺	Mg ²⁺	31.2	54	40.4	2.11	19	–
	H ₂ mr	31–40	4.28	1.04	39	5.3	5.0	26.8	0.50	0.17	0.33	20.0	Ca ²⁺	Mg ²⁺	26.8	50	25.0	1.50	17	–
13	AYao	0–5	4.31	1.05	63	5.4	4.3	33.5	1.33	0.33	1.00	11.0	Ca ²⁺	Mg ²⁺	13.8	29	7.9	0.63	13	<2.0
	AY	5–20	1.55	1.02	93	5.1	4.1	6.25	0.27	0.03	0.23	7.2	Ca ²⁺	Mg ²⁺	9.7	61	3.9	0.28	14	<2.0
	G	20–35	0.61	1.01	99	5.6	4.4	1.82	0.10	0.02	0.08	3.5	Ca ²⁺	Mg ²⁺	4.8	73	0.15	0.03	5	<2.0
	CG~~	35–50	0.55	1.01	99	5.9	4.4	1.63	0.10	0.02	0.08	2.9	Ca ²⁺	Mg ²⁺	4.0	71	0.16	0.03	5	<2.0

гером для формирования ММП в суглинистых почвах стали относительно холодные климатические условия XX в. В дальнейшем по мере формирования верхнего торфяного горизонта глубина сезонного протаивания уменьшилась, в 2012 г. она была около 50 см, что значительно меньше мощности СТС, характерной для автоморфных мерзлотных профилей [17].

Температурный режим торфозема мерзлотно-го, по сравнению с торфяными олиготрофными почвами плоскобугристых болот, значительно мягче как по летним, так и по зимним характеристикам. В большей мере его температурный режим схож с таковым торфяных мерзлотных почв, сохраняющихся на крайнем южном пределе криолитозоны. Мягкость температурного режима торфозема можно объяснить высоким (50–90 см) снежным покровом и около нулевой ($-1...0^{\circ}\text{C}$) температурой многолетнемерзлых пород, подстилающих котловину озера [32]. Торфозем функционирует как прохладный ($0...+2^{\circ}\text{C}$) мелкомерзлотный (ММП до 1 м) близко сливающийся (слияние сезонного и многолетнемерзлых горизонтов в диапазоне 50–100 см) профиль.

Изначально в пределах котловины 2, аналогично котловине 1, сформировались климатически-обусловленные мерзлотные почвы [9]. Позднее в ходе сукцессионных изменений усилилось действие ландшафтных факторов, что привело к дифференциации температурных режимов почв. Многолетнемерзлые породы частично протаяли, оставшиеся мерзлотные почвы продолжили функционировать в качестве экосистемно-защищенных [38]. Данные мерзлотные почвы сформировались в условиях более холодного климата, ныне многолетнемерзлые горизонты сохраняются в условиях экосистемной защиты теплоизолирующей торфяно-минеральной толщи, сформировавшейся здесь еще до осушения озера.

В целом ландшафтные условия для сохранения мерзлотных почв в котловине 2 более благоприятны по сравнению с котловиной 1. Это обусловлено практически повсеместным распространением достаточно мощной (до 1 м) торфяно-минеральной толщи, покрывавшей дно котловины озера еще до его осушения [10]. В котловине 1 мощность поверхностных органогенных горизонтов не превышает 20 см, в качестве почвообразующих пород встречаются песчаные отложения, поверхность котловины сильно заболочена и в значительной степени покрыта кустарниковой растительностью.

Торфоземы котловины 2, в отличие от торфяных мерзлотных олиготрофных почв бугристых болот [7], характеризуются значительно большими величинами зольности (40–50%). Такие высокие показатели зольности почв в регионе характерны только для заиленных ненарушенных тор-

фяников, локализованных в поймах крупных рек и замкнутых котловинах [18]. Кроме того, по степени зольности торфяные горизонты котловины 2 соотносятся с озерными органо-минеральными сапропелевыми отложениями [23]. Меньшие значения зольности в почвах бугров котловины 2 могут быть объяснены и ранее повышенным положением участков дна бывшего озера, на которых сформировались современные торфяные бугры. Изучаемые торфоземы от мерзлотных торфяных почв водоразделов отличаются большими значениями pH, меньшим содержанием органического углерода и пониженным соотношением C/N. Данные отличия обусловлены большей разложённостью органического вещества и заиленностью торфяных отложений, существовавших до 1980-х гг. как донные отложения озера.

Статистический анализ показал, что среди исследованного массива значений физико-химических свойств почвенных горизонтов (57 шт.) выделяются 2 основные группы по уровню сходства до 20 в Евклидовом расстоянии (рис. 3). Эти группы удовлетворительно отделяют минеральные почвы котловины 1 от органогенных профилей котловины 2. При этом минеральные горизонты псаммозема и аллювиальной почвы, локализованных в разных котловинах, схожи (сходство около 10). Высоким (около 10) уровнем сходства обладают глеевые многолетнемерзлые горизонты, подстилающие торфоземы, с сезонноталым дерновым АУ (5–20 см) аллювиальной почвы. Значительное сходство между собой обнаруживают минеральные горизонты торфяно-глееземов в котловине 1. В котловине 2 торфоземы луговин схожи с перегнойно-глеевыми иловато-перегнойными почвами. Но наибольший уровень сходства (около 5) определен между горизонтами торфоземов бугров (профили 5 и 7) на глубинах 50–75 см. Также максимальное сходство показали горизонты средней части профиля (30–80 см) торфоземов луговин. Наименьшее сходство по физико-химическим свойствам с другими почвами котловин имеет профиль торфозема (разрез 6), сформировавшийся на оголенном пятне торфяного бугра при практически полном отсутствии растительности.

Сенокосение, проводимое в 1980-х гг. в котловине 2, не привело к заметным изменениям почвенных свойств, что характерно при малоинтенсивных сельскохозяйственных нагрузках [3].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Строение, свойства и температурные режимы почв дренированных озерных котловин Большеземельской тундры сильно дифференцированы, что определяется литологией донных отложений (почвообразующих пород), спецификой развития

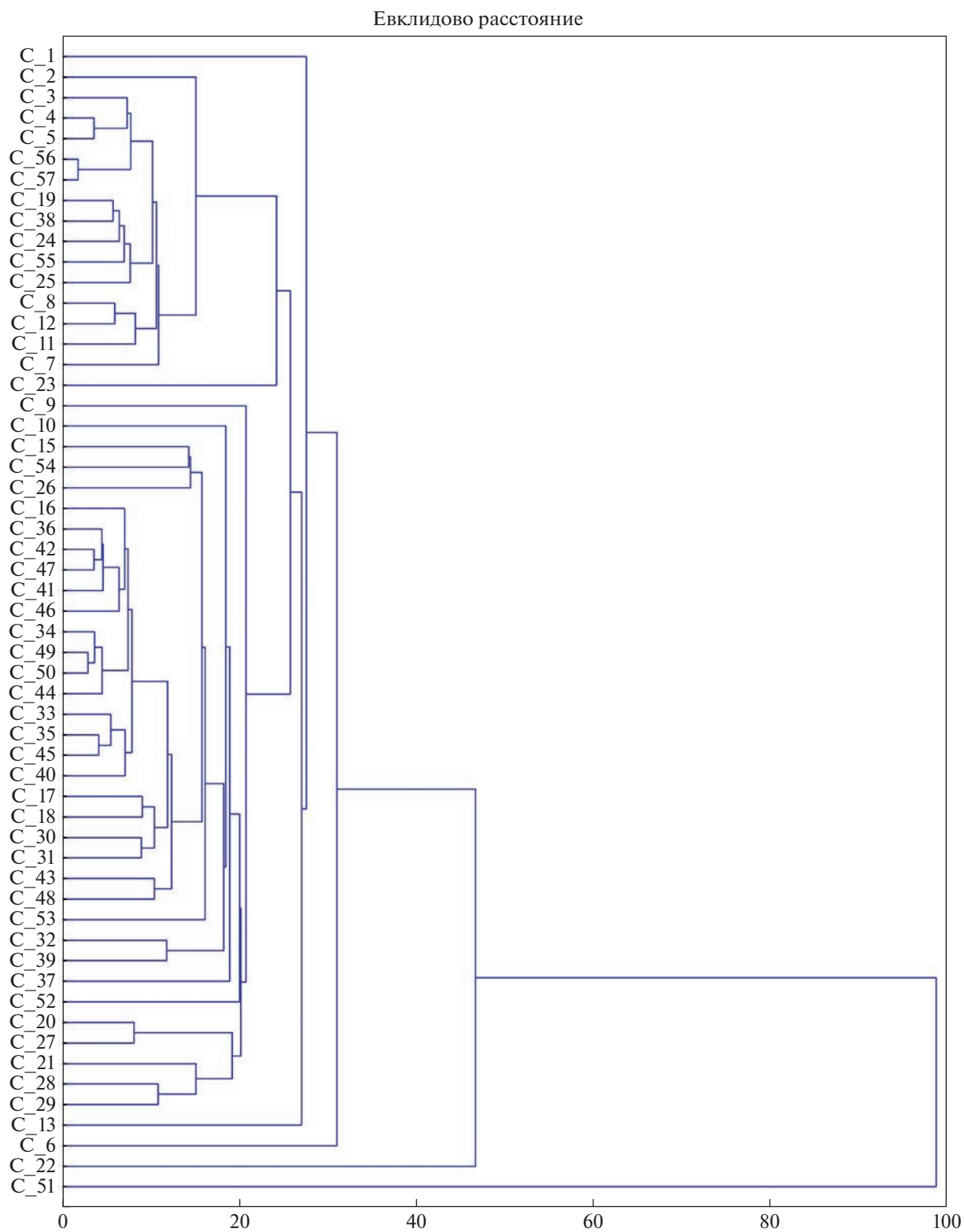


Рис. 3. Дендрограмма сходства горизонтов (евклидово расстояние) по физико-химическим свойствам почв. Индексами С в вертикальной оси показана последовательная (сквозная) нумерация почвенных горизонтов в профилях 1–13.

ландшафтов и проявления современных криогенных процессов.

В пределах озерной котловины с минеральными (глинистыми и песчаными) донными отложениями сформировались почвы, характерные для южных тундр европейского северо-востока России. Мерзлотные почвы в минеральной котловине развиты локально на дренированных участках с суглинистыми отложениями. Наличие маломощного (до 20 см) поверхностного органогенного горизонта обеспечивает торфяно-глееземам, функционирующим как экосистемно-модифицированные мерзлотные почвы, частичную защиту от протаивания. На дренированных песчаных буграх развиты холодные почвы с заглубленной кровлей многолетнемерзлых пород и выраженными сезонными колебаниями температуры в течение года. Все рассматриваемые почвы характеризуются низкой и средней степенью насыщенности основаниями, кислой реакцией среды. Наибольшие значения гидролитической кислотности выявлены в торфоземах под тундровой растительностью бугров, наименьшие — в минеральных почвах (псаммоземе и аллювиальной). Максимальной величиной обменной кислотности отмечены поверхностные органогенные горизонты торфяно-глееземов. Гумус исследованных почв относительно слабо обогащен азотом. Наблюдается закономерное накопление углерода и азота вглубь по профилю вследствие трансформации органического материала и надмерзлотной аккумуляции элементов. Геохимическими барьерами, ограничивающими нисходящую миграцию элементов, выступают многолетнемерзлые горизонты.

В котловине с органо-минеральными отложениями сформировались уникальные для Большеземельской тундры почвы — торфоземы луговин (торфоземы минерально-торфяные гумусово-стратифицированные мерзлотные). В котловине с заиленной торфяной толщей ландшафтные условия для формирования и сохранения мерзлотных почв наиболее благоприятны. Наличие мощной (до 1 м) толщи торфа предохраняет почвы от протаивания в летний период, мерзлотные почвы функционируют как экосистемно-защищенные профили. Мерзлотные торфоземы отличаются мягкостью температурного режима при малой глубине сезонного протаивания. По физико-химическим свойствам они характеризуются высокими показателями зольности (40–50%), слабокислой реакцией (pH_{H_2O} 5–6), умеренным для торфа содержанием органического углерода (20–30%) и соотношением C/N (до 20).

Несмотря на значительные различия, в обеих котловинах на дренированных участках сформировались мерзлотные почвы, защита от протаивания в которых обеспечивается преимущественно

сформированными органогенными горизонтами разной мощности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке темы НИР № 122040600023-8 “Криогенез как фактор формирования и эволюции почв арктических и бореальных экосистем европейского Северо-Востока в условиях современных антропогенных воздействий, глобальных и региональных климатических трендов”.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексютин Д.М., Мотенко Р.Г.* Теплофизические свойства и фазовый состав влаги мерзлых грунтов Уральского берега Байдарацкой губы // Инженерная геология. 2013. № 3. С. 36–43.
2. *Архангельская Т.А., Телятникова Е.В.* Температуропроводность торфо-песчаных и почвенно-торфяных смесей при различной влажности статья // Матер. III Междунар. науч. конф. “Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего”. СПб, 2021. С. 61–65.
3. *Герасимова М.И., Строганова М.Н., Можарова Н.В., Прокофьева Т.В.* Антропогенные почвы. Генезис, география, рекультивация. М.: Ойкумена, 2003. 270 с.
4. *Димо В.Н.* Тепловой режим почв СССР. М.: Колос, 1972. 360 с.
5. *Елсаков В.В., Марущак И.О.* Межгодовые изменения термокарстовых озер северо-востока европейской России // Исследования Земли из космоса. 2011. № 4. С. 45–57.
6. *Каверин Д.А., Пастухов А.В., Какунов Н.Б., Калмыков А.В.* Особенности формирования почв в котловине осушенного озера “Опытное” (европейский Северо-Восток России) // Известия Самарского научн. центра РАН. 2014. Т. 16. № 5. С. 43–50.
7. *Каверин Д.А., Пастухов А.В., Лантева Е.М., Биазы К., Марущак М., Мартикайнен П.* Строение и свойства почв многолетнемерзлых торфяников юго-востока Большеземельской тундры // Почвоведение. 2016. № 5. С. 542–556. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16050075>
8. *Каверин Д.А., Пастухов А.В., Мажитова Г.Г.* Температурный режим тундровых почв и подстилающих многолетнемерзлых пород (европейский северо-восток России) // Криосфера Земли. 2014. Т. XVIII. № 3. С. 23–32.
9. *Каверин Д.А.* Температурные режимы почв Субарктики европейского Северо-Востока в условиях современных климатических и ландшафтных изменений. Автореф. дис. ... докт. геогр. наук М., 2022. 48 с.

10. *Какунов Н.Б.* Климатические изменения и динамика водно-тепловых условий почвогрунтов и растительности в естественном и нарушенном состоянии // Геология разведки. 1980. № 7. С. 134–138.
11. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
12. *Кравцова В.И., Быстрова А.Г.* Изучение изменений распространения термокарстовых озер России по разновременным космическим снимкам // Криосфера Земли. 2009. Т. 15. № 2. С. 16–26.
13. *Кривошеков В.С.* Научные основы мелиорации и рационального использования земель в зоне многолетнемерзлых пород (на примере Чукотки). Автореф. дис. ... докт. географ. наук. Владивосток, 2000. 45 с.
14. *Кулюгина Е.Ю.* Растительность песчаных обнажений припечорских тундр // Растительность России. СПб., 2008. № 12. С. 39–61.
15. *Мажитова Г.Г.* Температурные режимы почв в зоне несплошной многолетней мерзлоты европейского северо-востока России // Почвоведение. 2008. № 1. С. 54–67.
16. *Оберман Н.Г., Шеслер И.Г.* Современные и прогнозируемые изменения мерзлотных условий Европейского северо-востока Российской Федерации // Проблемы Севера и Арктики Российской Федерации. Науч.-информ. бюл. 2009. Вып. 9. С. 96–106. <http://council.gov.ru/files/journalsf/number/20090922141450.pdf>
17. *Пастухов А.В., Каверин Д.А., Щанов В.М.* Построение региональных цифровых тематических карт (на примере карты запасов углерода в почвах бассейна р. Уса) // Почвоведение. 2016. № 9. С. 1042–1051. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16090100>
18. *Синькевич Е.И.* Эволюция и плодородие осушенных торфяных почв Европейского Севера России. Автореф. дис. ... докт. с.-х. наук. СПб, 1997. 48 с.
19. *Субетто Д.А.* Донные отложения озер: палеонтологические реконструкции. Санкт-Петербург: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2009. 343 с.
20. Теория и практика химического анализа почв / Под ред. Воробьевой Л.А. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
21. *Томирдиаро С.В.* Способ создания долговременных луговых угодий в тундре. Авт. свид. № 242751 // Бюл. изобр. М., 1969. № 15.
22. *Шило Н.А., Томирдиаро С.В., Киселев И.Е.* Формирование долговременных луговых угодий на искусственно осушенных землях днищ термокарстовых озер тундровой зоны СССР. Магадан, 1984. 53 с.
23. *Якушко О.Ф.* Белорусское поозерье. История развития и современное состояние озер Северной Белоруссии. Минск: Вышэйшая школа, 1971. 335 с.
24. *Billings W.D., Peterson K.M.* Vegetational change and ice-wedge polygons through the thaw-lake cycle in arctic Alaska // Arctic, Antarctic and Alpine Research. 1980. V. 12. P. 413–432. <https://doi.org/10.2307/1550492>
25. *Bockheim J.G., Hinkel K.M., Eisner W.R., Dai X.Y.* Carbon Pools and Accumulation Rates in an Age-Series of Soils in Drained Thaw-Lake Basins, Arctic Alaska // Soil Sci. Soc. Am. J. 2004. V. 68(2). P. 697–7004. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.6970>
26. *Burn C.R.* Tundra lakes and permafrost, Richards Island, western Arctic coast, Canada // Can. J. Earth Sci. 2011. V. 39(8). P. 1281–1298. <https://doi.org/10.1139/e02-035>
27. *Grosse G., Jones B.M., Arp C.D.* Thermokarst lakes, drainage, and drained basins // Treatise on Geomorphology. 2013. V. 8. P. 325–353. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00216-5>
28. *Hinkel K.M., Eisner W.R., Bockheim J.G., Nelson F.E., Peterson K.M., Dai X.Y.* Spatial extent, age, and carbon stocks in drained thaw lake basins on the Barrow Peninsula, Alaska // Arctic, Antarctic, and Alpine Research. 2003. V. 35. P. 291–300. [https://doi.org/10.1657/1523-0430\(2003\)035\[0291: Seaaacs\]2.0.Co;2](https://doi.org/10.1657/1523-0430(2003)035[0291: Seaaacs]2.0.Co;2)
29. 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. FAO, Rome.
30. *Jones Mariam C., Grosse Guido, Jones Benjamin M., Anthony Katey Walter.* Peat accumulation in drained thermokarst lake basins in continuous, ice-rich permafrost, northern Seward Peninsula, Alaska // J. Geophys. Res.: Biogeosciences. 2012. V. 117. P. G00M07. <https://doi.org/10.1029/2011jg001766>
31. *Jorgenson M.T., Shur Y.* Evolution of lakes and basins in northern Alaska and discussion of the thaw lake cycle // J. Geophys. Res.: Earth Surface. 2007. V. 112. P. F02S17. <https://doi.org/10.1029/2006JF000531>
32. *Kaverin, D.A., Melnichuk E.B., Shiklomanov N.I., Какунов Н.Б., Пастухов А.В., Шиклomanov A.N.* Long-term changes in the ground thermal regime of an artificially drained thaw-lake basin in the Russian European north // Permafrost and Periglacial Processes. 2017. V. 29. P. 49–59. <https://doi.org/10.1002/ppp.1963>
33. *Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Vishnyakova E.K., Koronatova N.G., Stepanova V.A., Kolesnychenko L.G., Khovalyng A.O., Peregon A.M.* Plant Organic Matter in Palsa and Khasyre Type Mires: Direct Observations in West Siberian Sub-Arctic // Atmosphere. 2021. V. 12(12). 1612. <https://doi.org/10.3390/atmos12121612>
34. *Loiko S., Klimova N., Kuzmina D., Pokrovsky O.* Lake Drainage in Permafrost Regions Produces Variable Plant Communities of High Biomass and Productivity // Plants. 2020. V. 9. 867. <https://doi.org/10.3390/plants9070867>
35. *Lunardini V.* Theory of n-factors and correlation of data // Proceedings, 3rd International Conference on Permafrost, Edmonton, Alberta, July 10–13. Ottawa, Ontario: National Research Council of Canada. 1978. V. 1. P. 40–46.
36. *Pedersen Joel A., Simpson Myrna A., Bockheim James G., Kumar Kartik* Characterization of soil organic carbon in drained thaw-lake basins of Arctic Alaska using NMR and FTIR photoacoustic spectroscopy // Org. Geochem. 2011. V. 42(8). 947–954. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2011.04.003>

37. *Regmi P., Grosse G., Jones M.C., Jones B.M., Anthony K.W.* Characterizing Post-Drainage Succession in Thermokarst Lake Basins on the Seward Peninsula, Alaska with Terra SAR-X Backscatter and Landsat-based NDVI Data // *Remote Sens.* 2012. V. 4(12). P. 3741–3765.
<https://doi.org/10.3390/rs4123741>
38. *Shur Y.L., Jorgenson M.T.* Patterns of permafrost formation and degradation in relation to climate and ecosystems // *Permafrost and Periglacial Processes.* 2007. V. 18. P. 7–19.
<https://doi.org/10.1002/pp.582>
39. *Yoshikawa K., Hinzman L.D.* Shrinking Thermokarst Ponds and Groundwater Dynamics in Discontinuous Permafrost near Council, Alaska // *Permafrost and Periglacial Processes.* 2003. V. 14. P. 151–160.
<https://doi.org/10.1002/ppp.451>
40. *Zona D., Oechel W.C., Peterson K.M., Clements R.J., PAW U.K.T., Ustin S.L.* Characterization of the carbon fluxes of a vegetated drained lake basin chronosequence on the Alaskan Arctic Coastal Plain // *Global Change Biol.* 2010. V. 16(6). P. 1870–1882.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02107.x>

Soil Formation Features in Drained Lake Basins of the Bolshezemelskaya Tundra

D. A. Kaverin^{1, *}, S. V. Deneva¹, A. V. Pastukhov¹, and S. V. Yakubenko²

¹*Institute of Biology Komi SC RAS, Syktyvkar, 167982 Russia*

²*Syktyvkar State University named after Pitirim Sorokin, Syktyvkar, 167001 Russia*

**e-mail: dkav@mail.ru*

The features of the structure, properties, and temperature regimes of soils functioning in two different drained lake basins of the Bolshezemelskaya tundra are characterized. The basins differ significantly in the features of landscape development, the composition of bottom (soil-forming) sediments, and the patterns of the soil and vegetation cover. In a naturally drained basin composed of mineral (sandy and clayey) bottom sediments, soils belonging to the departments Gley, and Poorly developed are formed, which are typical for the watershed landscapes of the region. Soils function as ecosystem-modified permafrost-affected profiles, partially protected from thaw. The soil profile is acidic, not saturated with bases, with moderate carbon content in the mineral horizons. In the artificially drained basin, covered with a layer of silted peat, predominantly peaty permafrost-affected soils were formed, including peat soils of tundra meadows, which are unique for the landscapes of the Bolshezemelskaya tundra. Peaty soils of the basin appear to be as ecosystem-protected, i.e. protected from thawing, and they are characterized by high ash content and slightly acidic reaction. A significant differentiation of the studied soil parameters are determined by different basins, which are different according to the composition of parent sediments, the specifics of landscape development, and manifestations of present-day cryogenic processes.

Keywords: drained lake basins, tundra soils, soil thermal regimes, permafrost