

## ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОЧВ В КРИОЛИТОЗОНЕ СЕВЕРО-ВОСТОКА ПЕЧОРСКОЙ НИЗМЕННОСТИ

© 2025 г. Д.А. Каверин<sup>a,\*</sup> (<https://orcid.org/0000-0003-2559-2340>),  
А.В. Пастухов<sup>a</sup> (<https://orcid.org/0000-0001-9368-9270>)

<sup>a</sup>Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, ул. Коммунистическая, 28, Сыктывкар, 167982 Россия

\*e-mail: dkav@mail.ru

Поступила в редакцию 29.03.2024 г.

После доработки 08.10.2024 г.

Принята к публикации 08.10.2024 г.

Охарактеризованы региональные географические закономерности распространения мерзлотных почв с учетом биоклиматических, геокриологических и литологических особенностей восточного сектора Печорской низменности. Географический анализ пространственной дифференциации мерзлотных почв проведен в контексте классификационной схемы генезиса многолетнемерзлых пород (ММП) Шура–Йоргенсена. Мерзлотные (преимущественно глеевые) почвы, подстилаемые климатически обусловленными ММП, широко распространены в северной части региона, где современные климатические условия благоприятны для сохранения многолетней мерзлоты в минеральных почвообразующих породах. Доля мерзлотных почв с климатически обусловленными ММП, слабо устойчивыми к вытаиванию при климатических изменениях, постепенно уменьшается к югу. Среди глеевых мерзлотных почв большая часть (до 70%) приходится на долю профилей с климатически обусловленными экосистемно модифицированными ММП. В этих почвах органогенные горизонты общей мощностью от 10 до 50 см отчасти обеспечивают экосистемную защиту многолетней мерзлоты от вытаивания. Торфяные мерзлотные почвы, ассоциированные с экосистемно защищенными ММП, максимально распространены (~20%) в центральной полосе регионального тундрово-таежного экотона, что обусловлено преимущественно сочетанием современных климатических и палеогеографических условий. Климатические изменения, прогнозируемые в равнинной части Субарктики европейского северо-востока России, приведут к частичному вытаиванию многолетней мерзлоты, затронув преимущественно мерзлотные почвы на климатически обусловленных ММП.

**Ключевые слова:** глеевые (Cryosols, Gleysols), альфегумусовые (Podzols), подзолистые (Retisols) и торфяные (Gleyic Histosols) почвы, многолетнемерзлые породы, равнинные ландшафты субарктики

**DOI:** 10.31857/S0032180X25020025, **EDN:** CPEARE

### ВВЕДЕНИЕ

В субарктических экосистемах, наиболее уязвимых к климатическим изменениям [32], неустойчивость мерзлотных почв и подстилающих их многолетнемерзлых пород (ММП) к вытаиванию является ключевым индикатором современных климатических и ландшафтных изменений [40]. Глобальное потепление оказывает большое влияние на почвы – ключевой элемент арктических экосистем, температурные режимы которых тесно взаимосвязаны с подстилающими ММП [33, 37]. Одной из актуальных проблем географии почв арктических регионов является исследование

почвенного покрова с учетом его состава, генезиса и эволюции [10, 12].

Гидроморфность территории оказывает значительное влияние на криолитозону и формирующиеся в ее пределах почвы [22]. Эволюция ландшафтов Печорской низменности в среднем и позднем неоплейстоцене и голоцене предопределила широкое развитие процессов заболачивания низменной равнины [2, 13, 19]. В настоящее время в южных тундрах региона общая заболоченность территории достигает 90–95%, а заторфованность (отношение площади торфяных болот к общей площади территории) – 50% [19]. Формирование торфяных отложений, характеризующихся низкой

теплопроводностью в талом состоянии [7], способствует возникновению и сохранению ММП [38]. Торфонакопление существенно изменило условия теплообмена в почвах, что привело к формированию ММП в болотных массивах в голоцене [24]. Промерзание почв, в свою очередь, влияет на торфонакопление, усиливая его в начале многолетнего промерзания болотных экосистем и замедляя на заключительных этапах [19].

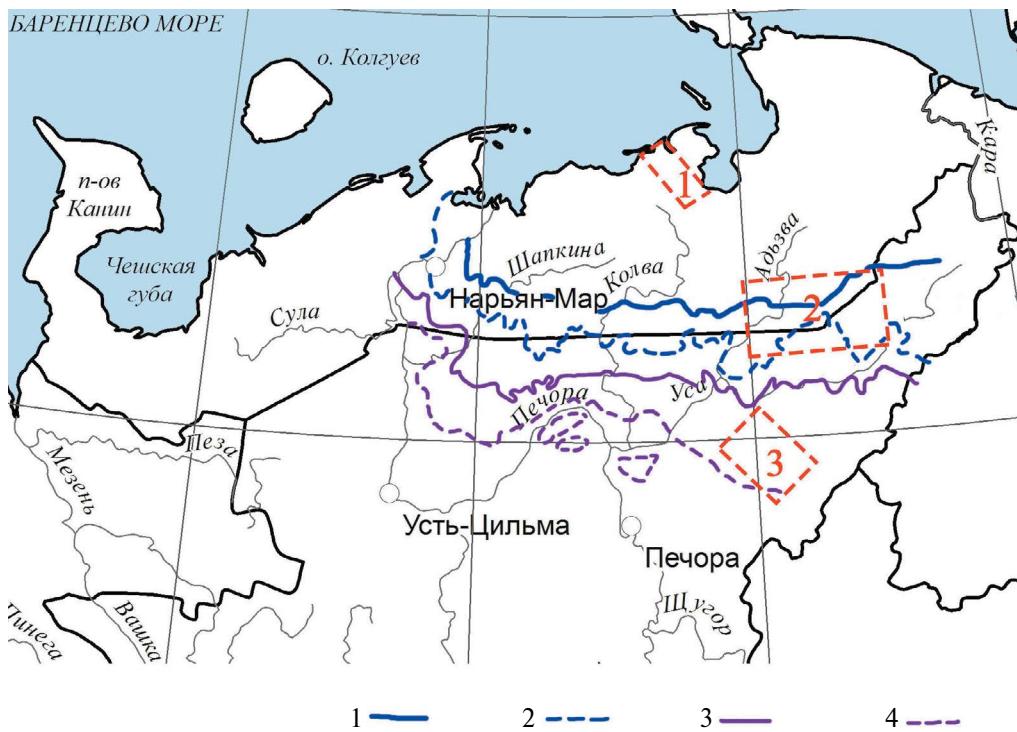
На востоке Печорской низменности криолитозона охватывает территорию с тундрово-таежным экотоном, многие компоненты которого особо чувствительны к современным климатическим изменениям. В северных районах криолитозоны при меньшей надземной биомассе растительности температура почвогрунтов, как правило, следует за динамикой температуры воздуха. В южной криолитозоне, где увеличивается мощность торфа, высота и сомкнутость растительного покрова, температура почв и почвообразующих пород меньше реагирует на повышение температуры воздуха [31]. Согласно листу 6 Почвенной карты РСФСР [1988] в восточной части Печорской низменности наибольшие массивы торфяных почв сосредоточены в полосе между  $66^{\circ}30'$  и  $67^{\circ}40'$  N. Данная территория характеризуется не сплошным характером распространения ММП [9] при сочетании бугристых болот с крупноерниковыми тундрами [15].

Потепление в XXI в. по прогнозным оценкам будет способствовать сокращению площади и мощности криолитозоны на севере европейской России [39]. Постепенное увеличение мощности сезонно-талого слоя почв, сопровождаемое опусканием кровли ММП, приведет к значительным ландшафтным изменениям в региональной криолитозоне [29]. Существование мерзлотных почв обусловлено сохранением подстилающих (почвообразующих) ММП.

Специфика криолитозоны и почвенного покрова восточной части Печорской низменности определила задачу настоящих исследований – выявление региональных географических закономерностей распространения мерзлотных почв, сформировавшихся в различных биоклиматических, геокриологических и ландшафтных условиях.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Состав почвенного покрова исследовали в трех районах, расположенных на аккумулятивно-дедаурационной ледово-морской равнине восточной части Печорской низменности, охватывающей Большеземельскую тундру с прилегающими к югу территориями лесотундры и крайне-северной тайги (рис. 1). Район исследований 1 площадью 1993 км<sup>2</sup> локализован на севере Большеземельской



**Рис. 1.** Географическое положение районов исследований, районы обозначены красными номерами и пунктирными границами на региональной карте-схеме. Южные границы распространения ММП [23]: 1 – сплошного (площадь ММП  $\geq 80\%$ ); 2 – прерывистого (ММП 50–80%); 3 – массивно-островного (ММП 20–50%); 4 – островного (ММП  $\leq 20\%$ ).

тундры ( $68^{\circ}10' - 68^{\circ}40'$  N,  $57^{\circ}40' - 59^{\circ}10'$  E) с абсолютными отметками 10–200 м. Район 1 расположен в подзоне сплошного (ММП  $\geq 80\%$ ) распространения многолетнемерзлых пород мощностью 300–400 м [9, 23], территория относится к подзоне типичных тундр [20]. Согласно Атласу Архангельской области [4], в растительном покрове доминируют разнотравно-осоково-моховые и кустарничково-лишайниковые тундры. В районе преобладают глееземы, торфяно-глееземы и торфяные олиготрофные (мерзлотные) почвы [5].

Район исследований 2 охватывает территорию общей площадью 17784 км<sup>2</sup> на юго-востоке Большеземельской тундры. Большая площадь района исследований обусловлена тем, что он занимает центральную полосу регионального тундрово-таежного экотона ( $66^{\circ}40' - 67^{\circ}30'$  N,  $60^{\circ}00' - 63^{\circ}00'$  E), покрываюю обширные территории южной тундры и лесотундры, расположенные в подзонах сплошного ( $\geq 80\%$ ), прерывистого (50–80%) и массивно-островного (20–50%) распространения ММП мощностью до 300 м [9, 23], занимающих 20, 60 и 20% территории района 2 соответственно. Абсолютные отметки территории района исследований варьируют от 100 до 200 м. Согласно листу Q-41 Воркута Государственной почвенной карты [11], в тундровых ландшафтах распространены мерзлотные и сезоннотрещающие почвы: глееземы, в том числе элювиированные, подбуры, торфяно-глееземы, торфяные олиготрофные, в том числе деструктивные (мерзлотные) почвы. В тундровых ландшафтах района 2 доминируют крупноерниковые растительные сообщества [4]. Под редколесьями лесотундры развиты сезоннотрещающие почвы: подзолисто-глеевые, глееподзолистые, торфяно-подзолисто-глеевые почвы, подзолы иллювиально-железистые [5].

Район исследований 3 площадью 4128 км<sup>2</sup> расположен к югу от Большеземельской тундры в юго-восточной части бассейна р. Уса ( $65^{\circ}20' - 66^{\circ}20'$  N,  $59^{\circ}20' - 61^{\circ}00'$  E), где преобладают высоты от 70 до 180 м над ур. м. Район находится в биоклиматической подзоне крайне-северной тайги со значительным ландшафтным разнообразием и островным ( $\leq 20\%$ ) распространением ММП мощностью 0–25 м [9, 23]. Согласно листу Q-41 Воркута [11], в районе распространены торфяно-глееземы, торфяные олиготрофные, в том числе деструктивные (мерзлотные) почвы, подзолисто-глеевые, глееподзолистые, торфяно-подзолисто-глеевые почвы, подзолы иллювиально-гумусовые. Геоинформационные методы – важный и современный инструмент анализа почвенного покрова [30]. Базой для построения цифровых карт почв являлись многозональные спутниковые снимки Landsat 7 ETM+ и географически привязанные топографические карты масштаба 1 : 100 000. При построении почвенных карт проводили

геоботаническое дешифрирование с дальнейшей привязкой к почвам и другим ландшафтным характеристикам [25]. Далее выполняли тематическую обработку с использованием подготовленных изображений методом управляемой классификации в программном пакете Erdas Imagine [34]. При обработке карт дополнительно использовали цифровые модели рельефа SRTM с разрешением 90 м, содержащие значения высоты местности в каждом пикселе. Расчеты площадей почв с учетом глубины залегания кровли ММП и мощности органогенных горизонтов проводили в программе MS Excel 2013. Для определения типов и подтипов почв в работе использовали классификацию и диагностику почв России [17].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Состав почвенного покрова.** Геоинформационный анализ почвенного покрова показал, что в районе исследований 1 доминируют (63%) автоморфные глееземы (табл. 1, рис. 2). Полугидроморфные почвы, представленные преимущественно торфяно-глееземами (Histic Reductaqueic Cryosols Loamic), занимают около 30% территории, тогда как гидроморфные (торфяные) почвы (Cryic Histosols) наименее распространены (~7%). Для болотных ландшафтов типичной тундры характерны как гидроморфные, так и полугидроморфные почвы. Засоленные почвы приморских низменных террас занимают лишь 3% территории. В целом в районе 1 мерзлотные почвы занимают >90% территории.

В пределах района исследований 2 на долю гидроморфных почв приходится около 24% площади, большая часть (18%) которых является мерзлотными. В основном это почвы плоско- и крупнобугристых болот. Наибольшая площадь занята полугидроморфными почвами (~52%), как мерзлотными, так и сезоннотрещающими. По сравнению с районом 1, в районе 2 значительно (~24%) снижается площадь автоморфных, в том числе мерзлотных почв. Среди автоморфных здесь доминируют сезоннотрещающие почвы: органо-криометаморфические (Stagnosols Loamic Cambic) и глееземы (Oxyaqueic Gleysols Clayic/Loamic). В лесных и редколесных экосистемах функционируют сезоннотрещающие почвы: на песчано-супесчаных почвообразующих породах – подбуры (Entic Podzols Arenic) и подзолы (Albic Podzols Arenic), на суглинках – подзолисто-глеевые почвы (Albic Gleyic Luvisols Loamic) и светлоземы (Albic Stagnosols Loamic Cambic). В совокупности сезоннотрещающие почвы тундровых и лесных экосистем занимают 57% территории района 2.

В районе исследований 3 почвы лесных экосистем занимают 60% территории, тундровых и интразональных – 31%. Площадь автоморфных почв, приуроченных преимущественно к лесным

Таблица 1. Состав почвенного покрова районов исследований

ПОЧВОВЕДЕНИЕ		Почвы [17]	Почвы [35]	Растительность	Глубина залегания кровли ММП, м	Тип ММП	Площадь, км <sup>2</sup>	Площадь, %
Стлошное распространение ММП (типичная тундра)								
Глеевмы		Reductaqueic Cryosols Loamic	Кустарничково-лишайниковые тундры	≤2	К	897.6	45.0	
Глеевмы криотурбинные	№ 2	Reductaqueic Cryosols Loamic	Разнотравно-осоково-моховые пятнисто-мелкобугорковатые тундры	≤1	К	184.9	9.3	
Торфяно-глеевмы		Histic Gleysols	Кустарничково-моховые тундры и полигональные болота	≤1	К <sup>М</sup>	569.8	28.6	
Подбуры		Entic Podzols Arenic	Разнотравно-осоково-моховые пятнисто-мелкобугорковатые тундры	—	—	99.9	5.0	
Торфяно-подбуры		Histic Entic Podzols Arenic	Кустарничково-лишайниковые тундры	2–3	К <sup>М</sup>	1.3	0.1	
Серогумусовые глеевые		Humic Gleysols Loamic	Разнотравно-осоково-моховые пятнисто-мелкобугорковатые тундры	—	—	50.1	2.5	
Торфяно-глеевмы перегнойно-торфяные засоленные		Histic Gleysols Fluvis	Болота травяные (осоковые) приморские	≤2	К <sup>М</sup>	30.0	1.5	
Темногумусово-глеевые (маршевые)		Mollic Gleysols Fluvis	Приморские засоленные луга (лайды)	—	—	24.4	1.2	
Торфяные олиготрофные		Folic Histosols	Кустарничково-лишайниковая (полигональные болота)	≤1	КЭ	133.2	6.7	
Торфяные эутрофные		Sapric Histosols	Травяно-типновые болота	1–2	КЭ	0.4	0.0	
Морские пески		—	—	—	—	1.0	0.1	
Нестлошное распространение ММП (тундрово-таежный экотон)								
Торфяные олиготрофные мерзлотные буров		Cryic Histosols	Кустарничково-мохово-лишайниковая (буристые болота)	≤1	КЭ	3139	17.6	
Торфяные олиготрофные мерзлотные мочажин		Cryic Fibric Histosols	Мохово-травянистая (буристые болота)	≤3	КЭ	102	0.6	

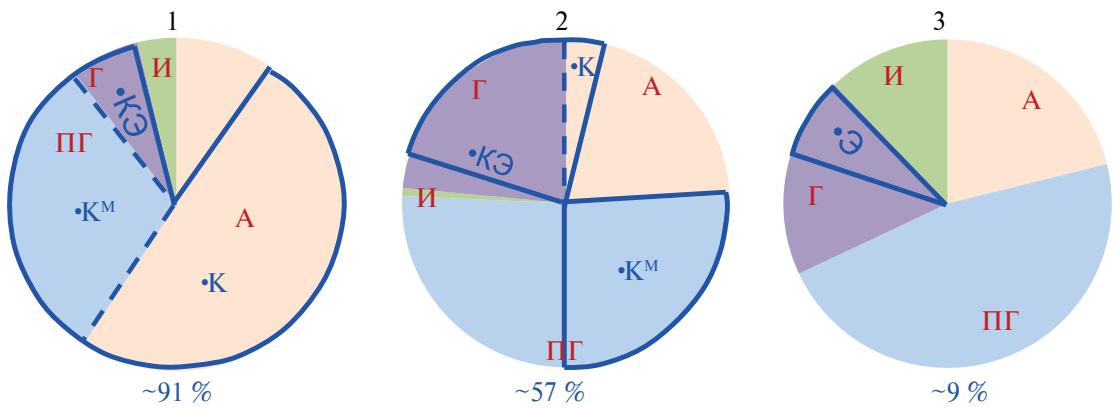
Продолжение табл. 1

Почвы [17]	Почвы [35]	Растительность	Глубина залегания кровли ММП, м	Тип ММП	Площадь, км <sup>2</sup>	Площадь, %
Торфяные олиготроф-ные	Folic Histosols	Кустарничково-мохово-(лишайнико-вая) различных типов болот	—	—	98	0.5
Глеевоземы мерзлотные	Reductaqueic Cryosols Loamic	Кустарничково-мохово-лишайнико-вые тундры	≤3	K	1390	7.8
Торфяно-глеевоземы мерзлотные	Histic Reductaqueic Cryosols Loamic	Кустарничково-моховые тундры	≤2	K <sup>M</sup>	4688	26.5
Пойменные аллюви-альные	Fluviosols Folic	Пойменные луга и редколесья	—	—	21	0.1
Пойменные аллюви-альные торфянистые	Gleyic Histic Fluviosols	Пойменные заболоченные луга	—	—	17	0.1
Глеевоземы	Folic Gleysols	Кустарниковые тундры	—	—	482	2.7
Торфяно-глеевоземы	Histic Gleysols	Кустарниковые тундры	—	—	3043	17.1
Подзолы, подбуры	Albic/Entic Podzols Arenic	Мохово-лишайниковые тундры	—	—	161	0.9
Торфяно-подзолы	Histic Podzols Arenic	Кустарничково-мохово-лишайнико-вые тундры	—	—	1074	6
Органо-криомета-морфические и глеево-криометаморфиче-сные	Stagnosols Loamic Cambic	Кустарничково-мохово-лишайнико-вые тундры	—	—	2161	12.2
Светлоземы и подзоли-сто-глеевые	Albic Stagnosols Loamic Cambic	Елово-березовые редколесья	—	—	964	5.4
Торфяно-светлоземы и глеевоподзолистные	Histic Albic Stagnosols Loamic, Albic Gleyic Luvisols Loamic	Елово-березовые редколесья	—	—	343	1.9
Слабодифференциро-ванные	Regosols	—	—	—	102	0.6

Окончание табл. 1

Почвы [17]	Почвы [35]	Растительность	Глубина залегания кровли ММП, м	Тип ММП	Площадь, км <sup>2</sup>	Площадь, %
Островное распространение ММП (крайнесеверная тайга)						
Подзолисто-глеевые	Albic Gleyic Luvisols Loamic	Елово-березовые леса	—	—	206	5
Подзолы	Albic Podzols Arenic	Еловые леса (лишайниковые)	—	—	172	4.2
Подзолисто-глеевые литобарьерные	Albic Gleyic Luvisols Abruptic	Еловые и елово-пихтовые леса	—	—	494	12
Торфяно-подзолисто-глеевые	Histic Albic Gleyic Luvisols Loamic	Еловые леса (заболоченные)	—	—	1300	31.5
Торфяно-подзолы глеевые	Gleyic Histic Podzols Arenic	Еловые леса (заболоченные)	—	—	256	6.2
Торфяные олиготрофные мерзлотные, в т.ч. деструктивные	Hemic/ Sapric Cryic Histosols	Кустарничково-мохово-лишайниковая/лишайниковая (буторристые болота)	≤1	Э	390	9.4
Торфяно-глеевые	Stagnic Histic Gleysols	Болота верховые	—	—	379	9.2
Торфяные олиготрофные деструктивные мерзлотные, в т.ч. типичные	Hemic/ Sapric Cryic Histosols Turbic	Мохово-лишайниковая (буторристые болота)	≤1	Э	0.3	0
Торфяные олиготрофные и торфяно-глеевые	Hemic/ Sapric Histosols, Stagnic Histic Gleysols	Болота верховые	—	—	405	9.8
Торфяные эутрофные (в т.ч. глеевые) перегнойно-торфяные	Sapric Histosols Dystric	Болота низинные	—	—	27	0.7
Аллювиальные гумусовые, гумусовые глеевые и торфяно-глеевые	Gleyic/Histic Fluvisols Humic	Пойменные леса и луга	—	—	499	12.1

Примечание. ММП – типы многолетнемерзлых пород; К – климатически обусловленные; К<sup>М</sup> – экосистемно модифицированные; КЭ – климатически обусловленные экосистемы защищенные; Э – экосистемы защищенные.



**Рис. 2.** Доли почв с различной мощностью органогенных горизонтов в структуре почвенного покрова участков исследований: А – автоморфные; ПГ – полугидроморфные; Г – гидроморфные. Типы многолетнемерзлых пород (ММП): К – климатически обусловленные; К<sup>М</sup> – экосистемно модифицированные; КЭ – климатически обусловленные экосистемно защищенные. Синими контурами и цифрами показаны доли мерзлотных почв. Нумерация участков исследований показана сверху диаграмм.

екосистемам, составляет ~21%. В районе преобладают полугидроморфные почвы (~47% территории), среди которых доминируют торфяно-подзолисто-глеевые (*Histic Albic Gleyic Luvisols Loamic*<sup>1</sup>) лесных экосистем. Гидроморфные почвы в совокупности занимают до 32% площади. Комплексы торфяных олиготрофных мерзлотных почв (*Cut Histosols*) занимают около 9% территории, встречаясь только в контурах бугристо-мочажинных болот, которые распространены вплоть до 65°50' N.

**Типизация мерзлотных почв.** В мерзлотных почвах одним из основных критериев наряду с глубиной залегания кровли ММП (до 1–2 м) становится мощность органогенных (торфяных) горизонтов. Данный параметр особенно важен для территорий с несплошным (20–80%) распространением ММП, когда характеристики почв определяют наличие или отсутствие подстилающих многолетнемерзлых горизонтов. В частности, это актуально для района исследований 2, охватывающего центральную полосу обширного тундрово-таежного экотона.

В классификации и диагностике почв России [17] присутствуют четкие критерии разделения почв по мощности органогенных горизонтов. В регионе автоморфные почвы, как правило, обладают маломощной (до 10 см) оторфованной подстилкой. Однако для полугидроморфных почв, к которым в Большеземельской тундре относятся преимущественно торфяно-глеевые, в классификации применяется очень широкий диапазон мощности (10–50 см) верхних органогенных горизонтов. Гидроморфные почвы с мощностью торфяных горизонтов более 50 см выделяются отдельно на очень высоком иерархическом уровне, в составе

органогенного ствола [17]. Схожие значения используются в системе WRB [35], где при мощности торфа более 10 см выделяется горизонт *Histic*, при мощности более 40 см – почвы классифицируются в отдельной группе *Histosols*.

Торфяные залежи по своей мощности разделяются на маломощные (50–100 см), среднемощные (100–200 см) и мощные (>200 см) [1]. Среднемощные и мощные торфяные залежи преимущественно характерны для крупнобугристых болот, широко распространенных в региональных подзонах с несплошным и островным распространением ММП [8, 21].

Географические закономерности дифференциации мерзлотных почв по мощности органогенных горизонтов рассмотрены в аспекте классификационной схемы генезиса ММП Шура–Йоргенсена [38]. Эта схема применима для различных регионов криолитозоны и в призме данных исследований объясняет существование разных типов мерзлотных почв. Последние, как компонент ландшафта, оказывают значительное влияние на многолетнемерзлые породы.

Согласно классификационной схеме климатически обусловленные многолетнемерзлые породы (ММП К) сформировались и продолжают существовать в благоприятных для сохранения многолетней мерзлоты климатических условиях. Они включают в себя и экосистемно модифицированные многолетнемерзлые породы (ММП К<sup>М</sup>), которые изначально образовались как климатически обусловленные и позднее эволюционировали совместно с экосистемами. Климатически обусловленные ММП включают в себя и экосистемно защищенные многолетнемерзлые породы (ММП КЭ), которые сформировались и

<sup>1</sup> В WRB (2022) для группы *Luvisols* среди основных квалифиликаторов (principal qualifiers) отсутствует *Histic*.

продолжают существовать в благоприятном для сохранения многолетней мерзлоты климате и, кроме того, дополнительно защищены компонентами экосистем (теплоизоляционные свойства мощных торфяных горизонтов). Собственно экосистемно защищенные многолетнемерзлые породы (ММП Э) сформировались в более холодных условиях, однако в настоящее время их существование определяется только теплоизоляционными свойствами торфяных толщ бугристых болот.

В соответствии с принципами классификации генезиса ММП [38] и приведенной группировке почв по мощности органогенного горизонта, автоморфные мерзлотные (в основном глеевые) почвы в регионе приурочены преимущественно к ММП К. Данный тип многолетнемерзлых пород широко распространен в северной части региональной криолитозоны, где современный климат более благоприятен для их сохранения в минеральных почвообразующих породах. Близкое к поверхности залегание минеральных горизонтов при малой мощности подстилки обеспечивает повышенную температуропроводность почв и подстилающих (почвообразующих) пород как в теплый, так и холодный период года. Климатически обусловленные многолетнемерзлые породы, подстилающие глееземы, в большей мере подвержены вытаиванию при потеплении [36].

Полугидроморфные мерзлотные почвы приурочены к ММП К<sup>М</sup>. В основном это торфяно-глееземы мерзлотные, которые встречаются практически во всех геокриологических подзонах. Многолетняя мерзлота сохраняется в подстилающих минеральных, как правило, глинисто-суглинистых горизонтах. Сформировавшийся в этих почвах органогенный слой мощностью 10–50 см обеспечивает частичную экосистемную защиту подстилающих ММП от вытаивания, значительно снижая суммарную температуропроводность профиля в теплый период года. Формирование торфяных горизонтов в почвах с ММП К<sup>М</sup> происходило на протяжении длительного периода. Например, возраст углерода торфяно-глеезема на участке мониторинговой площадки CALM R2, где мощность торфа около 20 см, составил около  $2600 \pm 60$  лет (неопубликованные данные Г.Г. Мажитовой, проект Permasom, образец 9, 2008 г.). Данный возраст практически полностью совпадает с Субатлантическим периодом, на протяжении которого в регионе сформировались контуры современной тундровой зоны и многолетней криолитозоны.

Отделение климатически обусловленных экосистемно защищенных от собственно экосистемно защищенных ММП может проводиться согласно геокриологической зональности [9, 23] островной (<20%) криолитозоны, где многолетняя мерзлота сохраняется только в мощных торфяных залежах, мерзлотные почвы приурочены к

ММП Э. При распространении ММП более 10%, они встречаются и в минеральных почвообразующих породах, а значит, являются еще и климатически обусловленными. Соответственно, торфяные мерзлотные почвы здесь становятся приуроченными к ММП КЭ. Условно в регионе можно выделить две большие группы мерзлотных почв, ассоциирующиеся с многолетнемерзлыми породами, где ведущим фактором их сохранения является либо климат (ММП К + ММП К<sup>М</sup>) либо экосистемная защита (ММП КЭ + ММП Э). Это в определенной степени унифицирует географический анализ распространения мерзлотных почв разных геокриологических/биоклиматических подзон. Мерзлотные почвы с экосистемно защищенными многолетнемерзлыми породами (ММП КЭ + ММП Э) полностью сложены торфяными горизонтами, обеспечивающими крайне низкую температуропроводность в теплый период года и повышенную в холодный.

**Географический анализ распространения мерзлотных почв.** В почвенном покрове района 1 преобладают мерзлотные профили с климатически обусловленными ММП, представленные широко распространенными здесь автоморфными почвами: глееземами (Oxyaquiic Gleysols Clayic/Loamic), подбурами (Entic Podzols Arenic), серогумусовыми глеевыми (Humic Gleysols Loamic). Широкое развитие автоморфных почв обусловлено преобладанием холмистых равнин, сложенных плейстоценовыми и голоценовыми морскими отложениями песчано-супесчаного состава [4]. Доля торфяных почв, ассоциированных с ММП КЭ в районе, не превышает 7%. Низкая доля торфяных профилей обусловлена значительной дренированностью территории и малой мощностью торфяных залежей. В контурах полигональных и травяно-гипновых болот района, согласно классификации почв [17], формируются как криогидроморфные, так и полуgidроморфные профили.

В несплошной криолитозоне района 2 мерзлотные почвы (глееземы) с климатически обусловленными ММП занимают только 8% территории. Однако в районе широко (26%) распространены торфяно-глееземы мерзлотные с ММП К<sup>М</sup>. На территории существенно (до 18%) увеличивается доля торфяных почв, представленных в основном криогидроморфными почвами болотных ландшафтов, ассоциированных с ММП КЭ. В пределах обширных плоских заболоченных водно-ледниковых равнин бугристые болота получили значительное распространение [4, 16].

В районе 3 торфяные почвы с экосистемно защищенными ММП занимают около 9% территории, функционируя исключительно в условиях торфяных толщ бугристых болот. Аналогичная доля приходится на долю сезоннопромерзающих торфяных почв, характерных для северо-таежных болотных массивов без многолетней мерзлоты.

Существование торфяных мерзлотных почв в крайне-северной тайге района 3 объясняется наличием мощных торфяных залежей, сформированных в голоцене [26].

Геоинформационный анализ состава почвенного покрова показал, что в регионе исследований среди мерзлотных почв относительная доля профилей с климатически обусловленными ММП ( $K + K^M$ ) снижается с ~90% в районе 1 до 0% в районе 3 (рис. 3). На этом фоне относительная доля мерзлотных почв на экосистемно защищенных ММП ( $K^E + E$ ) к югу возрастает: от 10% в сплошной криолитозоне до 100% в островной. При этом их абсолютная доля достигает максимума (~20%) в пределах центральной полосы регионального тундрово-таежного экотона с прерывистым и массивно-островным распространением ММП (район 2). В районе 2 почвы с климатически обусловленными ММП суммарно занимают больше территории (34%), чем таковые с ММП  $K^E$ , однако их основная часть (26%) представлена полугидроморными профилями на ММП  $K^M$ .

Район 2 большей частью характеризуется доминированием слабодренированных ландшафтов, характерных для аккумулятивно-денудационной равнины на юго-востоке Большеземельской тундры. Здесь широко развиты как крупно- так и плоскобугристые болота (рис. 4), торфяные толщи которых в условиях современного климата остаются законсервированными многолетней мерзлотой.

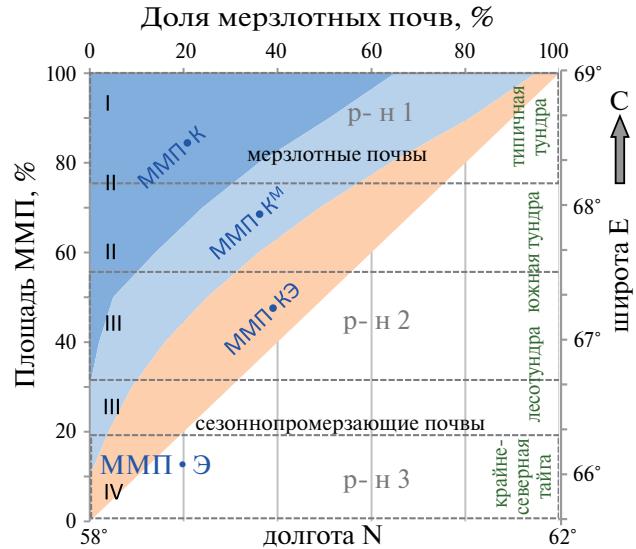


Рис. 3. Географические закономерности распространения мерзлотных почв. Подзоны распространения ММП: I – сплошного; II – прерывистого; III – массивно-островного; IV – островного. Серой пунктирной линией выделены широтные границы районов исследований.

В четвертичный период в этой части Печорской низменности (70–200 м над ур. м.) аккумулировались ледниковые и водно-ледниковые отложения, которые в позднем неоплейстоцене были охвачены низкотемпературными ( $T_{\text{год}} \sim -15^{\circ}\text{C}$ ) ММП. После

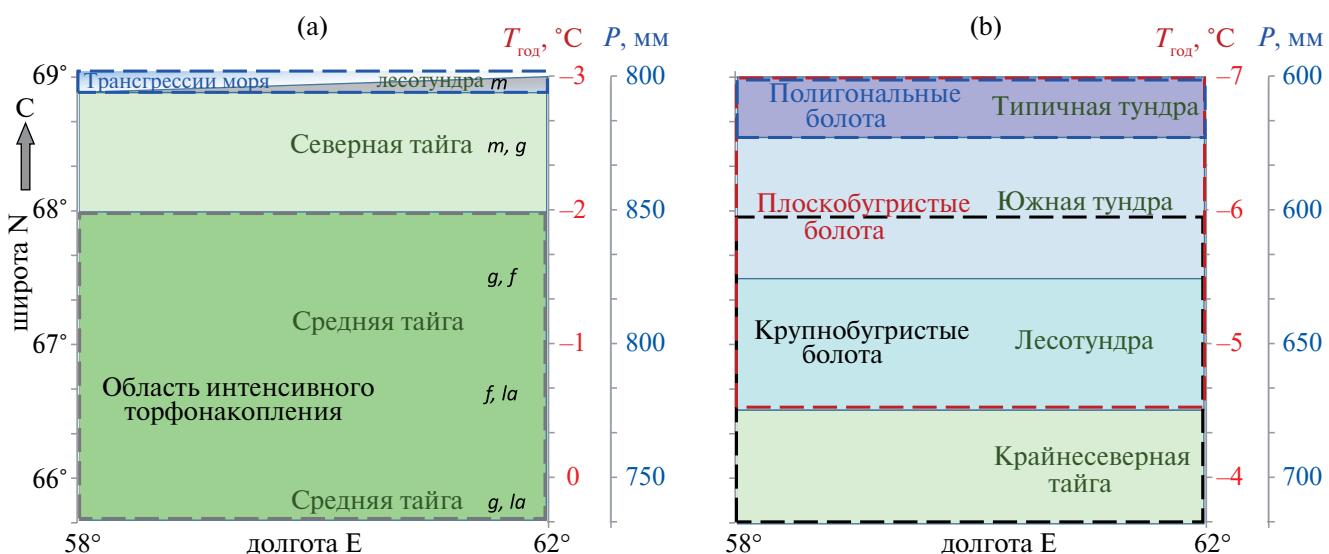


Рис. 4. Физико-географическая обстановка на аккумулятивно-денудационной ледово-морской равнине: (а) – в период климатического оптимума голоцене [2, 18,]; (б) – в настоящее время [5, 6, 14, 21]. Климатические характеристики:  $T_{\text{год}}$  – среднегодовая температура воздуха;  $P$  – годовое количество осадков. Преобладающие четвертичные отложения:  $m$  – морские;  $g$  – ледниковые;  $f$  – водно-ледниковые;  $la$  – озерно-ледниковые. На части (а) пунктирными линиями оконтурены области: серой – интенсивного торфонакопления и синей – морских трансгрессий в голоцене. На части (б) пунктирными линиями оконтурены области преобладания болот: синей – полигональных, коричневой – плоскобугристых, черной – крупнобугристых.

вытаивания плейстоценовых полигональных систем повторно-жильных льдов, в период климатического оптимума голоцена, в районе происходило интенсивное торфонакопление [19], сформировались торфяные толщи мощностью до 3–4 м. Мягкие климатические условия (среднегодовые температуры воздуха от –2 до 0°C, осадки около 800 мм/год) были максимально благоприятными для торфонакопления на Севере России [28].

К югу и северу от центральной части экотона, в подзонах сплошного и островного распространения ММП, общая доля мерзлотных почв с экосистемно защищенными ММП уменьшается. На севере это очевидно связано с меньшей интенсивностью торфонакопления в голоцене, в период оптимума которого здесь располагались северо-таежные и даже лесотундровые экосистемы. Тогда как на южном пределе криолитозоны, где болотные экосистемы занимают значительные территории (~20%), существование мерзлотных почв возможно только в локальных криогидроморфных условиях крупнобугристых болот.

Учитывая прогнозные исследования (модель HIRHAM для конца XXI в.), потепление в регионе в большей степени затронет климатически обусловленные ММП [29]. При этом экосистемно защищенные ММП останутся преимущественно мерзлыми даже в неблагоприятных для их существования климатических условиях (среднегодовая температура воздуха 0–2°C). Соответственно, произойдет существенное сокращение площади мерзлотных почв, большая часть которых (~70%) в настоящее время обеспечивает существование климатически обусловленных ММП.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мерзлотные почвы с климатически обусловленными многолетнемерзлыми породами в регионе представлены преимущественно автоморфными глеевыми профилиями с широким диапазоном глубины залегания многолетнемерзлой кровли (до 2 м). Эти почвы широко распространены в северной части региональной криолитозоны, где климатические условия более благоприятны для сохранения многолетней мерзлоты в минеральных (в основном глинисто-суглинистых) почвообразующих породах. В торфяно-глееземах мерзлотных с климатически обусловленными экосистемно модифицированными ММП сформировался торфяный горизонт мощностью от 10 до 50 см, обеспечивающий частичную защиту подстилающей многолетней мерзлоты от вытаивания. Почвы, подстилаемые экосистемно защищенными ММП, представлены в основном торфяными мерзлотными почвами, широко распространенными в низменных равнинах региона.

Географический анализ состава почвенного покрова показал, что среди мерзлотных профилей постепенно снижается относительная доля почв с климатически обусловленными ММП с ~90% в сплошной криолитозоне до 0% в островной. На этом фоне относительная доля мерзлотных почв, подстилаемых экосистемно защищенными ММП возрастает от 10% на севере региона до 100% на юге. При этом их абсолютная доля достигает максимума (~20%) в пределах центральной полосы регионального тундрово-таежного экотона с прерывистым и массивно-островным распространением ММП. Высокая доля торфяных мерзлотных почв здесь обусловлена сочетанием современных климатических и палеогеографических условий. В пределах низменных равнин тундрово-таежного экотона широко распространены плоско- и крупнобугристые болота, мощные торфяные толщи которых формировались на протяжении голоцена. А современный климат еще способствует сохранению многолетней мерзлоты в подстилающих породах.

Географический анализ состава почвенного покрова восточной части Печорской низменности выявил широкое распространение мерзлотных почв, подстилаемых экосистемно защищенными ММП, относительно устойчивыми при климатических изменениях. Прогнозируемое для Субарктики европейского Севера потепление в XXI в. приведет к частичному вытаиванию преимущественно климатически обусловленных ММП, что значительно сократит долю мерзлотных почв в северной части криолитозоны.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках темы государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН № 125021902454-1 “Почвы и почвенные ресурсы Европейского Севера-Востока России в условиях современных климатических изменений, антропогенного пресса и социально-экономических вызовов”.

## СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аветов Н.А., Кузнецов О.Л., Шишконакова Е.А. Опыт использования классификации и диагностики почв России в систематике торфяных почв

- биогеоценозов олиготрофных болот северотаежной подзоны Западной Сибири // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2019. № 4. С. 37–47.
2. *Андреичева Л.Н.* Плейстоцен европейского Северо-Востока. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 322 с.
3. *Андреичева Л.Н., Голубева Ю.В.* Эволюция природной среды и климата Арктики в квартере // Вестник Института геологии. 2008. № 4. С. 2–6.
4. Атлас Архангельской области / Под ред. Федорова Д.Ф. М.: Главное управление геодезии и картографии при совете министров СССР, 1976. 72 с.
5. Атлас Республики Коми / Отв. ред. Корниенко Е.В. М.: Феория, 2011. 448 с.
6. Атлас Республики Коми по климату и гидрологии / Отв. ред. Таскаев А.И. М.: Дрофа, Дик, 1997. 115 с.
7. *Вакулин А.А.* Основы геокриологии. Тюмень: Изд-во Тюменского гос. ун-та, 2011. 220 с.
8. *Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Волкова Е.М., Сулержицкий Л.Д., Чижова Ю.Н., Юнгнер Х.* Радиоуглеродные датировки и голоценовая динамика бугров пучения в долине реки Уса // Доклады АН. 2002. Т. 384. № 3. С. 395–401.
9. Геокриологическая карта СССР. М-б 1 : 2.5 млн. / Под ред. Ершовой Е.Д., Кондратьевой К.А. М.: Мин. геологии СССР и МГУ, 1998. 16 л.
10. *Горячkin С.В.* Почвенный покров Севера (структур, генезис, экология, эволюция). М.: ГЕОС, 2010. 414 с.
11. Государственная почвенная карта России, масштаб 1 : 1 млн. Лист Q-41 “Воркута” / Отв. ред. Шишов Л.Л. М.: ФСГКР, 2000.
12. *Губин С.В., Лупачев А.В.* Подходы к классификации почв аккумулятивных берегов морей восточного сектора Российской Арктики // Почвоведение. 2022. № 1. С. 25–32.  
<https://doi.org/10.31857/S0032180X22010051>
13. *Исаков В.А.* Геолого-геоморфологическое районирование бассейна р. Сейды (восток Большеземельской тундры) на основе цифровой модели рельефа ArcticDEM // Вестник геонаук. 2023. № 10. Т. 346. С. 42–50.  
<https://doi.org/10.19110/geov.2023.10.5>
14. *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.
15. Карта растительности европейской части СССР. М-б 1 : 2500000 / Под ред. Исаченко Т.И., Лавренко Е.М. М.: ГУГК, 1979. Лист 2.
16. Карта четвертичных отложений территории Российской Федерации. М-б: 1 : 2500000 / Под ред. Петрова О.В. М.: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, ФГБУ ВСЕГЕИ, 2010.
17. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
18. Литолого-палеогеографическая карта СССР. Четвертичный период. Последниковые 10-0 тыс. лет. / Под ред. Безруков П.Л. и др. М-б 1 : 7500000. М.: ГУГиК Министерства геологии СССР, 1966.
19. *Максимова Л.Н., Оспенников Е.Н.* Эволюция болотных систем и мерзлотных условий Большеземельской тундры в голоцене // Криосфера Земли. 2012. Т. 16. № 3. С. 53–61.
20. *Матвеева Н.В.* Зональность в растительном покрове Арктики // Тр. Ботанического ин-та им. В.Л. Комарова. 1998. Вып. 21. 220 с.
21. *Осадчая Г.Г.* мерзлотные ландшафты Большеземельской тундры как основа рационального природопользования: Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. Ухта, 2018. 36 с.
22. *Осадчая Г.Г., Тумель Н.В.* Локальные ландшафты как индикаторы геокриологической зональности (на примере европейского северо-востока) // Криосфера Земли. 2012. Т. XVI. № 3. С. 62–71.
23. *Осадчая Г.Г., Тумель Н.В., Зенгина Т.Ю., Лаптева Е.М.* Обзорная геокриологическая карта Большеземельской тундры (Республика Коми и Ненецкий автономный округ). М-б 1 : 1000 000 // Отчет проекта ПРООН/ГЭФ/ЕС “Укрепление системы особо охраняемых природных территорий Республики Коми в целях сохранения биоразнообразия первичных лесов в районе верховьев р. Печора”. Сыктывкар, 2015. 112 с.
24. *Оспенников Е.Н.* Болотообразование // Основы геокриологии. Ч. 4. Динамическая геокриология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. С. 600–612.
25. *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>
26. *Пастухов А.В., Марченко-Вагапова Т.И., Каверин Д.А., Кулижский С.П., Кузнецов О.Л., Панов В.С.* Динамика развития бугристых торфяников на южной границе Восточно-Европейской криолитозоны // Почвоведение. 2017. № 5. С. 544–557.  
<https://doi.org/10.7868/S0032180X17030091>
27. Почвенная карта РСФСР М 2.5 млн под ред. В.М. Фридланда. М.: ГУГК, 1988. Лист 6.
28. *Пьявченко Н.И.* Торфяные болота, их природное и хозяйственное значение. М.: Наука, 1985. 153 с.
29. *Ривкин Ф.М., Власова Ю.В., Пармузин И.С.* Закономерности изменения геокриологических условий в результате осадки мерзлых пород при оттаивании // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI. № 6. С. 26–34.

30. Савин И.Ю. Анализ почвенных ресурсов на основе геоинформационных технологий. Автореферат дис. ... докт. с./х. наук. М., 2004. 50 с.
31. Шполянская Н.А., Осадчая Г.Г., Малкова Г.В. Современное изменение климата и реакция криолитозоны (на примере Западной Сибири и европейского севера России) // Вестник МГОУ. Сер. Географическая среда и живые системы. 2022. № 1. С. 6–30. <https://doi.org/10.18384/2712-7621-2022-1-6-30>
32. Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzli J., Matthes H., Vieira G., D.A. Streletskiy, Schoeneich P., Romanovsky V.E. et al. Permafrost is warming at a global scale // Nature Communications. 2019. V. 10(1). P. 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4>
33. Bockheim J. Cryopedology. N.Y.: Springer, 2015. 177 p.
34. ERDAS Field Guide 2005. Georgia: Leica Geosystems Geospatial Imaging, 2006. 653 p.
35. IUSS Working Group WRB. 2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria.
36. Kaverin D., Malkova G., Zamolodchikov D., Shiklomanov N., Pastukhov A., Novakovskiy A., Sadurtdinov M., Skvortsov A., Tsarev A., Pochikalov A., Maltitsky S., Kraev G. Long-term active layer monitoring at CALM sites in the Russian European North // Polar Geography. 2021. V. 44. <https://doi.org/10.1080/1088937X.2021.1981476>
37. Romanovsky V., Isaksen K., Drozdov D., Anisimov O., Instanes A., Leibman M., McGuire A.D., Shiklomanov N., Smith S., Walker D. Changing permafrost and its impacts // Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) // Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). 2017. P. 65–102.
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. Stendel M., Christensen J. H., Marchenko S., Romanovsky V., Kaverin D., Rinke A., Matthes H., Kuhry P., Rivkin F., Daanen R. Size matters – very high resolution permafrost simulations on the 4 km scale in northeast European Russia // Geophysical. Res. Abstr. 2011. № 13. P. EGU2011-6493.
40. Streletskiy D.A., Shiklomanov N.I., Little J.D., Nelson F.E., Brown J., Nyland K.E., Klene A.E. Thaw subsidence in undisturbed tundra landscapes, Barrow, Alaska, 1962–2015 // Permafrost and Periglacial Processes. 2017. V. 28(3). P. 566–572. <https://doi.org/10.1002/ppp. 1918>

## Soil Geographic Pattern in Cryolithozone of the North-East of Pechora Lowland

D. A. Kaverin<sup>a</sup>, \* and A. V. Pastukhov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, 167982 Russia

\*e-mail: dkav@mail.ru

The regional geographic patterns of distribution of permafrost soils are characterized, taking into account the bioclimatic, geocryological and lithological features of the eastern sector of the Pechora Lowland. Geographic analysis of the spatial differentiation of permafrost soils was carried out in the context of the classification scheme for the genesis of permafrost. Permafrost (mainly gley) soils underlain by climatically determined permafrost rocks are widespread in the northern part of the region, where modern climatic conditions are favorable for the preservation of permafrost in mineral soil-forming rocks. The proportion of frozen soils with climate-related permafrost, weakly resistant to thawing during climate change, gradually decreases to the south. Among gleyic permafrost soils, the majority (up to 70%) falls on profiles with climate-related, ecosystem-modified permafrost. In these soils, organic horizons with a total thickness of 10 to 50 cm partly provide ecosystem protection of permafrost from thawing. Peaty permafrost soils associated with ecosystem-protected permafrost are maximally distributed (~20%) in the central zone of the regional tundra-taiga ecotone, which is mainly due to a combination of modern climatic and paleogeographic conditions. Climate changes predicted in the flat part of the Subarctic of the European north-east of Russia will lead to only partial thawing of permafrost, affecting mainly frozen soils on climate-related permafrost.

**Keywords:** gley soils (Cryosols, Gleysols), Al-Fe-humus soils (Podsols), podsolic soils (Retisols), peaty soils (Cryic Histosols), permafrost, Subarctic, lowland landscapes