

УДК 551.345

ИДЕНТИФИКАЦИОННЫЕ ПРИЗНАКИ ПЕРЕХОДНОГО И ПРОМЕЖУТОЧНОГО СЛОЕВ В ПОЛИГОНАЛЬНЫХ ТОРФЯНИКАХ СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2021 г. Е. С. Королева^{1,*}, Е. А. Слагода¹, Академик РАН В. П. Мельников^{1,2}, Е. А. Бабкина¹, А. В. Хомутов¹, О. Л. Опокина¹, М. М. Данько¹, Я. В. Тихонравова³

Поступило 03.03.2021 г.

После доработки 04.03.2021 г.

Принято к публикации 05.03.2021 г.

Рассматривается верхняя часть подповерхностной компоненты криосферы Земли – полигональные торфяники, которые имеют обширное распространение в криолитозоне. Льдистые переходный и промежуточный слои в полигональных торфяниках севера Западной Сибири служат буферной зоной при протаивании мерзлых пород сверху под воздействием климатических колебаний, поэтому их выделение является актуальной задачей. Определены характерные особенности, соотношение со льдами разного генезиса и свойства торфа этих слоев. Выявлены различия строения промежуточного слоя, связанные с полигональным микрорельефом поверхности. В результате мониторинга сезонно-талого слоя зафиксировано протаивание переходного слоя на фоне современно современных климатических изменений. Установлены индикаторы для выделения переходного и промежуточного слоев – криогенное строение, степень сохранности, цвет, влажность и плотность торфа.

Ключевые слова: полигональный торфяник, многолетнемерзлые породы, переходный слой, промежуточный слой, климатические условия

DOI: 10.31857/S2686739721060098

ВВЕДЕНИЕ

Углубление понимания эволюции криосферы Земли – одна из важнейших задач криологии. Динамика процессов в криосфере по своей интенсивности не сравнима ни с какими другими оболочками нашей планеты. Но в самой криосфере, состоящей из надповерхностного атмосферного слоя, поверхностного или гляциосферы и подповерхностного – криолитозоны, особенности процессов резко различаются. В решении сложной задачи вещественно-энергетических преобразований, влияющих на изменения жизненно важных условий для всей биоты Земли, значение строения, свойств и причин изменчивости во всех компонентах криосферы является абсолютно необходимым. В этом сообщении рассматриваются

приповерхностные образования криолитозоны – полигональные торфяники, занимающие до 80% площади низких геоморфологических уровней севера Западной Сибири [1]. Они, как и другие виды отложений слоя сезонных колебаний температур, чувствительны к изменениям климата. Под воздействием климатических колебаний в нижней части сезонно-талого слоя (СТС) торфяников формируются переходный и промежуточный слои. Сведений о наличии и строении таких слоев в торфяных залежах, а также классификационных признаков для их выделения опубликовано мало. Высокую льдистость выделенной переходной зоны необходимо учитывать при прогнозе снижения кровли многолетнемерзлых пород (ММП). В ближайшие десятилетия переходный и промежуточный слои торфяников могут перейти в талое состояние, поэтому исследования их строения и свойств на фоне современного потепления остаются актуальной палеогеографической задачей.

В верхней части криолитозоны Восточной Сибири Ю.Л. Шур [2, 3] выделил переходную зону между ежегодно оттаивающим СТС и ММП, в которую были включены переходный и промежуточный слои. *Переходный слой* он отнес к нижней части СТС, который ежегодно не оттаивает, не

¹ Институт криосферы Земли Тюменского Научного центра Сибирского отделения Российской академии наук, Тюмень, Россия

² Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

³ Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Россия

*E-mail: koroleva_katy@inbox.ru

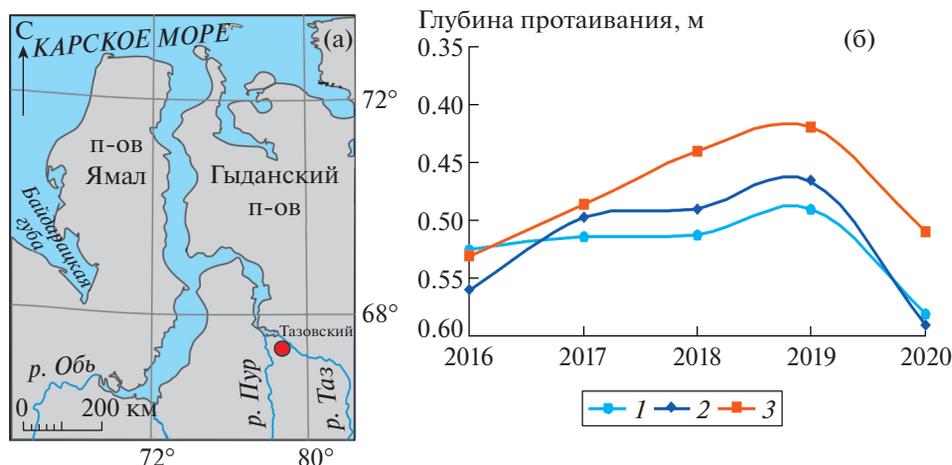


Рис. 1. (а) схема расположения района исследования; (б) межгодовая динамика глубины протаивания на различных поверхностях: 1 – центральная поверхность полигонов, 2 – периферийная часть полигонов, 3 – межполигональные понижения.

менее трех лет находится в мерзлом состоянии и выполняет защитную роль для ММП. Промежуточный слой был отнесен к верхней части ММП, является реликтовым переходным слоем, фиксирующим увеличение глубины СТС за счет разных причин: изменения ландшафтно-фациальной обстановки или более продолжительного периода потепления климата [2]. Автором установлены следующие признаки промежуточного слоя в слоистых отложениях: криотурбированность, повышенная льдистость, специфические атакситовые, сложнослоистые, поясковые криогенные текстуры с преобладанием вертикальных шпиров льда, ростки в кровле повторно-жильных льдов и элементарные жилки за счет морозобойного растрескивания. На севере Якутии этот слой залегает как над жилами льда, так и над блоками грунта в полигонах, и по латерали малоизменчив. В торфяниках переходный и промежуточные слои не были выявлены [2]. Перечисленных классификационных признаков недостаточно для выделения переходного и промежуточного слоев в торфяниках и минеральных грунтах на Европейском Севере [4].

Сведения об особенностях строения переходного и промежуточного слоев в мощных горизонтах торфа на севере Западной Сибири в основном отсутствуют [5]. Поэтому вопрос отличительных особенностей для слоев, образующих буферную зону для ММП, остается актуальным.

РАЙОН, ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Район исследований расположен на Пур-Тазовском междуречье (рис. 1а) в 20–40 км южнее пос. Тазовский. Он приурочен к 3-й озерно-ал-

лювиальной равнине с абсолютными высотами 30–50 м, с многочисленными термокарстовыми понижениями с озерами и хасыреями [6]. Верхняя часть мерзлых толщ сложена четвертичными аллювиальными, озерными и озерно-болотными песками, супесями, суглинками и торфами. Полигональные торфяники в районе исследований распространены преимущественно в хасыреях, термокарстово-эрозийных ложбинах с остаточными озерами на поймах озер и малых рек. На севере Пур-Тазовского междуречья ММП имеют сплошное распространение. Глубина СТС в торфяниках в днищах хасыреев в среднем за период 50–80-х годов XX века составляла 0.4 м [7]. В связи с потеплением климата после 2000 г. глубина СТС увеличилась до 0.6 м [8, 9]. В полигональных торфяниках распространены полигонально-жильные льды с вертикальным размером более 4–5 м [10]. Жилы льда имеют гетерогенное строение, связанное с локальным протаиванием в ходе сингенетического промерзания озерно-болотных отложений в голоцене [11].

В 2016 г. на площадках мониторинга Пур-Тазовского междуречья, расположенных в хасыреях с полигональными торфяниками, наблюдалось углубление СТС (от 0.53 до 0.56 м) на всех элементах рельефа (рис. 1б), обусловленное аномально теплым летним сезоном (рис. 1б). В последующие 2017–2019 гг. глубина СТС не достигла величины 0.51 м (среднее – 0.49 м). 2020 г. характеризовался самым длительным за 5 лет теплым сезоном, продолжительность которого составила 153 дня, тогда как в предыдущие годы – 124–144 дня. Глубина СТС на полигонах увеличилась и составила 0.58–0.59 м, а в межполигональных понижениях отмечены меньшие величины СТС –

0.51 м, за счет просадок торфа и частичного вытаивания льдов (рис. 1б).

Комплексные геоэкологические исследования включали изучение строения разрезов мерзлого и талого торфа в полигонах и межполигональных понижениях над жилами в хасырях, измерения глубины СТС, характеристику криогенных текстур, аналитические определения влажности и плотности торфа [12].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В 2017–2020 гг. в хасырее под полигонами и межполигональными понижениями над жилами изучены разрезы торфяника, в которых выделены слои различного строения: талые и мерзлые, с разной льдистостью и плотностью, с криогенными текстурами и включениями разных генетических типов льда.

В разрезе полигона (рис. 2) вскрыты снизу вверх: *Слой 1.* Торф автохтонный черный рыхлый из мхов с корнями осоки, слоистый за счет чередования мхов, корней, стеблей растений. Торф с глубины 0.75 м многолетнемерзлый с корковыми, линзовидными и массивными криогенными текстурами и горизонтально-волнистыми шлирами льда на глубине 1.8–2.0 м и 1.3–1.5 м (по данным 2019 г.), выше – талый (1а). Влажность торфа с корковыми, массивными криогенными текстурами составляет 1280–1600%, плотность – 0.95–0.96 г/см³; в торфе со шлирами льда влажность – 1238–1909%, плотность 0.98–0.99 г/см³. В талой части слоя (1а) влажность торфа уменьшается снизу вверх от 519 до 363%; плотность составляет внизу 0.54–0.59 г/см³, вверху 0.69–0.84 г/см³. Вскрытая мощность 1.3 м; *Слой 2.* Торф плотный коричневый из разложенных растительных остатков, слагает нижнюю часть СТС. Влажность меняется от 299 до 342%; плотность – 0.94–0.99 г/см³; мощность 0.3–0.35 м; *Слой 3.* Переслаивание торфа преобладающего рыхлого рыже-коричневого и плотного темно-коричневого. Толщина прослоев и линз торфа 1–8 см; слоистость в целом повторяет микрорельеф поверхности полигона: мелко-волнистая, плавная с затеками и просадками, осложнена внедрениями вверх, т.е. криотурбациями. Влажность торфа меняется от 355 до 462%; плотность – 0.84–0.86 г/см³; мощность 0.15–0.2 м; *Слой 4.* Мохово-растительный слой, представленный рыхлым зеленым и серым отмершим мхом, внизу с корнями багульника и морошки; мощность 0.05 м.

Разрез в межполигональном понижении шириной более 2.5 м над крупной ледяной жилой (рис. 3а) вскрыл снизу вверх: *Слой 1.* Торф многолетнемерзлый льдистый рыхлый автохтонный из мхов, стеблей трав, веточек кустарничков. Влажность мерзлого торфа вмещающего жилу льда от

558 до 1050%, плотность 0.89–0.94 г/см³; влажность торфа около линз и шлиров термокарстово-полостного льда от 1015 до 1842%, плотность от 0.93 до 0.98 г/см³. Вскрытая мощность 0.8 м; *Слой 2.* Торф плотный коричневый из разложенных растительных остатков, залегает в боковых стенках и выклинивается над жилой. Мощность от 0.25 до 0 м; *Слой 3.* Переслаивание торфа из мхов темно-оранжевого рыхлого и темно-коричневого плотного, в интервале глубин 0.4–0.55 м, мерзлый с горизонтально-волнистыми шлирами льда, корковыми, линзовидными и массивными криотекстурами, выше талый. Криотурбации в слое образованы волнистой плавной слоистостью, затеками и просадками, и инъекцией рыхлого торфа над центром жилы (в зоне более глубокого протаивания). Мерзлый темно-оранжевый торф имеет влажность от 599 до 4383%, плотность этого торфа от 0.91 до 0.96 г/см³. Темно-коричневый торф имеет влажность от 537 до 5430%, плотность 0.91–1.0 г/см³. Талый темно-оранжевый торф имеет влажность от 660 до 944%, плотность 0.82–1.04 г/см³. Талый темно-коричневый торф с влажностью 162–343% отличается большей плотностью 0.95–1.16 г/см³; в инъекции над серединой жилы коричневый торф имеет более низкую плотность 0.81–0.90 г/см³. Нижняя граница слоя неровная. Мощность 0.8 м; *Слой 4.* Почвенно-растительный слой представлен рыхлым мхом, лишайниками и отмершими серыми прослоями мхов с корнями. Мощность 0.05–0.2 м.

В разрезе торфа выделены полигонально-жилы, термокарстово-полостной и сегрегационный льды. Жила вертикально-полосчатого пузырчатого льда клиновидной формы с симметричными плечиками на боковых стенках имеет видимый вертикальный размер 1.2 м; ширину в кровле – 0.6 м; на уровне верхних плечиков – 1.1 м, на уровне нижних плечиков – 2.6 м. В верхние и нижние плечики жилы вложены линзы прозрачного стекловатого с пузырьками воздуха термокарстово-полостного и инфильтрационно-сегрегационного льда. К нижним плечикам жилы и линзам льда примыкают изогнутые шлиры прозрачного льда толщиной 10–11 см, залегающие в торфе полигона на глубине 0.85–1.15 м.

В центре полигона, в 50 м от изученного разреза, горизонт автохтонного торфа вскрыт скважиной на полную мощность – 4.4 м. Отложения в керне имеют хорошо выраженную слоистость по цвету, влажности и плотности, характерную для торфа полигонов (см. рис. 2). Зоны повышенной льдистости, изменения криогенных текстур и шлиры льда залегают в тех же интервалах глубин – 0.55–0.7 и 0.9–1.3 м (рис. 3б).

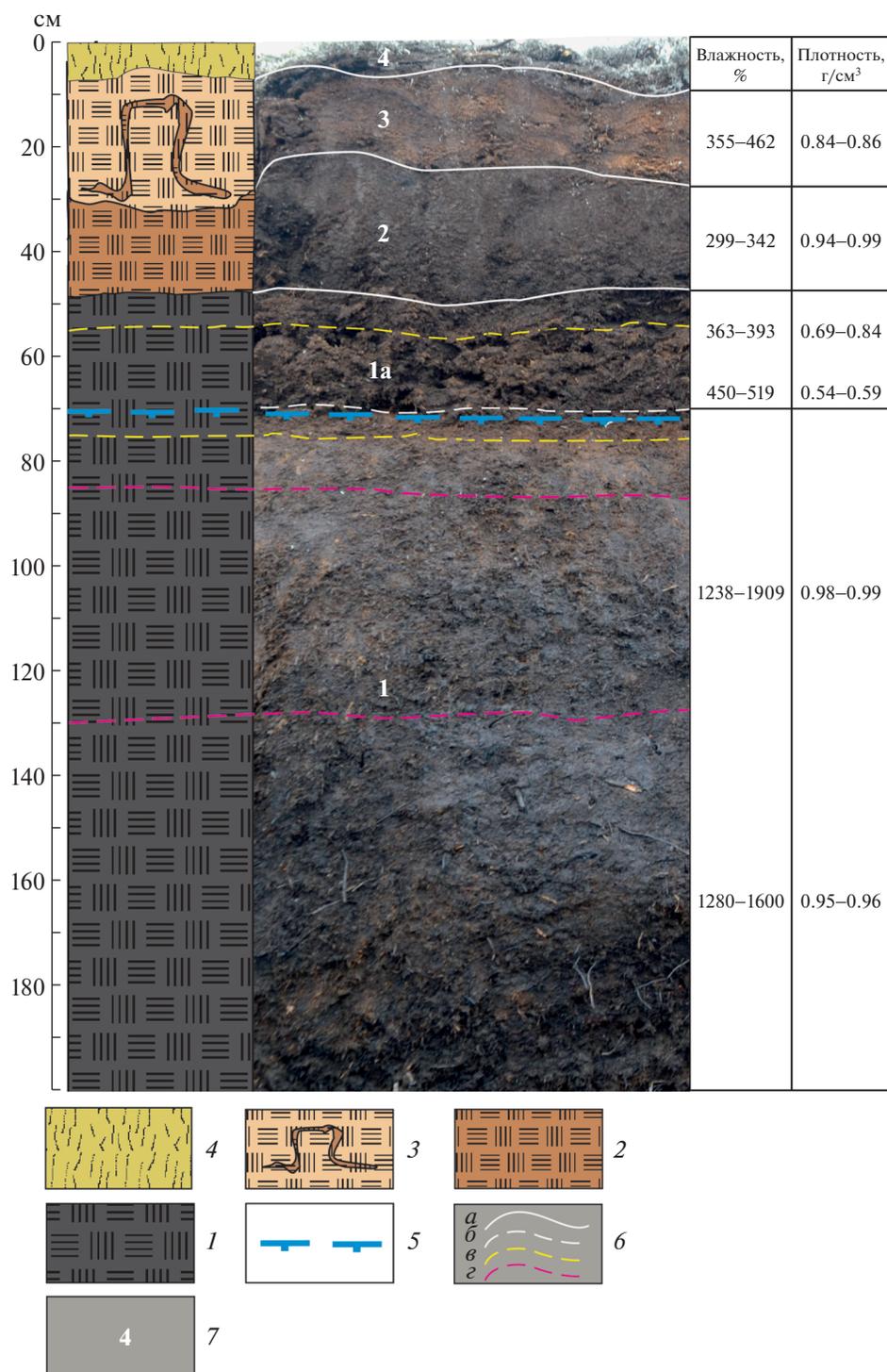


Рис. 2. 1–4 – слои торфа (см. описание в тексте); 5 – граница ММП; 6 – границы: слоев торфа (а, б), верхнего промежуточного слоя (в), нижнего промежуточного слоя (г); 7 – номера слоев.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные за 5 лет данные о свойствах и строении торфа, изменении глубины протаивания позволили выделить в разрезах торфяников элементы, соответствующие переходному и промежуточному слоям.

Переходный слой включает нижнюю часть СТС, которая не протаивала на протяжении 3 лет [2] (см. рис. 16): торф мощностью 0.07 м в интервале глубин 0.51–0.58 м. В 2017–2019 гг. этот слой выделялся по криотурбациям, повышенной льдистости, включениям тонких шлиров и линз

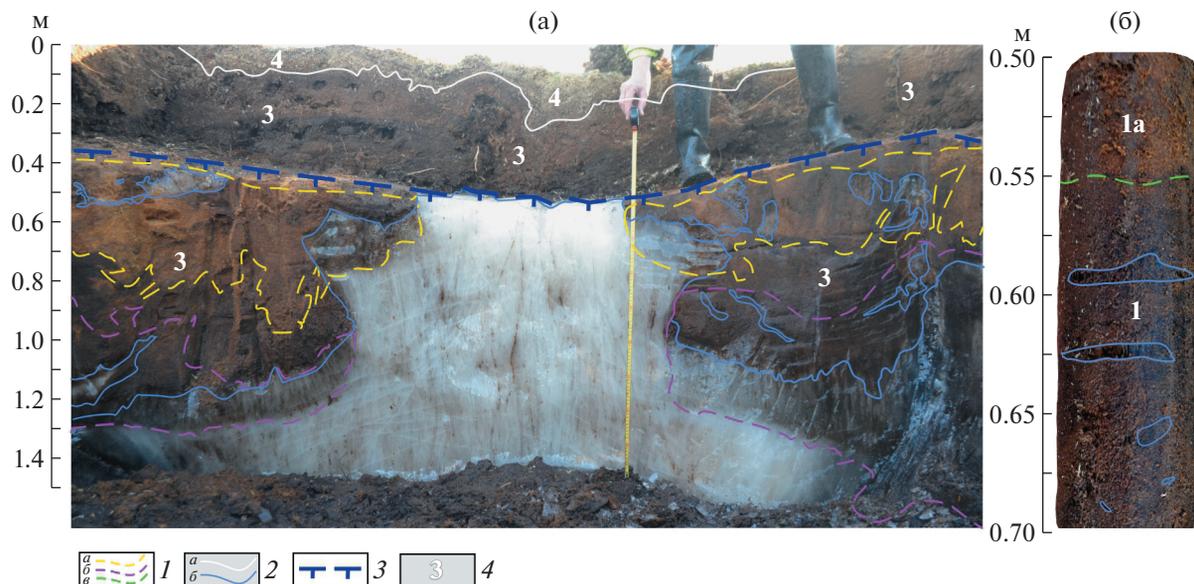


Рис. 3. (а) разрез В8ж-20, (б) керн торфа. 1 – границы: верхнего промежуточного слоя (а), нижнего промежуточного слоя (б), переходного слоя (в); 2 – границы: слоев (а), льдов (б); 3 – граница ММП; 4 – номера слоев.

сегрегационного, инфильтрационно-сегрегационного льда. В 2020 г. вследствие теплого и раннего лета слой в основном полностью протаял. В межполигональных понижениях он включает талые отложения, которые выполняют пологую просадку над кровлей жилы, и фрагменты торфа (слой 3), сохранившиеся в мерзлом состоянии за счет меньшей глубины протаивания относительно полигонов. В разрезе полигона переходный слой выделяется только в мерзлом керне по желтовато-коричневому цвету торфа (слой 1а, см. рис. 3б), приобретенному в предшествующие протаивания за счет процессов окисления. Влажность талого переходного слоя в полигонах и межполигональных понижениях практически не различается, но отмечена меньшая плотность свежееоттаявшего торфа в межполигональном понижении за счет протаивания льда и оттока влаги (табл. 1).

Частичное протаивание современного переходного слоя, вызванное современными климатическими изменениями, проявляется в просадке

отложений в межполигональных понижениях или в развитии процессов пучения на валиках полигонов. Большая глубина протаивания в термоэрозионных промоинах обусловлена лучшим прогревом стенок полигонов по сравнению с их центрами. В этом случае переходный слой частично или полностью протаивает и плохо выделяется аналитическими и визуальными методами. Так как глубина переходного слоя в протаявшем торфянике может варьировать в зависимости от динамики высоты поверхности, в качестве критерия для его выявления следует использовать данные мониторинга по изменению мощности СТС за предшествующие 3–4 года. В 2016–2018 гг. переходный слой в разрезах был представлен свежееоттаявшим торфом желто-коричневого цвета, более плотным за счет разложения растительных остатков в отличие от синкриогенного торфа.

Промежуточный слой. В пределах межполигональных понижений выделено два промежуточных слоя: 1) нижний на глубине 0.85–1.3 м, включающий слой 3 и 4; 2) верхний на глубине 0.55–0.7 м,

Таблица 1. Свойства торфа переходного и промежуточного слоев в мерзлом и талом состоянии

	Полигон		Межполигональное понижение	
	Влажность, %	Плотность, г/см ³	Влажность, %	Плотность, г/см ³
Переходный слой	724–837	0.96	718–733*	0.81*
Верхний промежуточный слой	1131–1279	0.95–0.97	537–5430	0.91–1.0
Нижний промежуточный слой	1238–1909	0.98–0.99	1015–1842	0.93–0.98
Синкриогенный торф	1280–1600	0.95–0.96	558–1050	0.89–0.94

Примечание. * – талый торф.

представленный слоем 3. В пределах полигонов верхний промежуточный слой был выделен только в скважине в интервале глубин 0.55–0.7 м по наличию шпиров льда толщиной до 0.5–1.5 см (рис. 3б), в расчистках полигонов верхний промежуточный слой выделен не был, так как, скорее всего, вытаял. Нижний промежуточный слой выделен по наличию шпиров льда до 3 см на глубине 0.85–1.3 м.

К признакам *промежуточного слоя* в торфяниках отнесены: 1) Криотурбации, просадки и инъекции в пределах кровли мерзлого торфа. Формирование криотурбации происходило в результате циклического промерзания и протаивания, уплотнения торфа и его деформаций. Просадки были вызваны неравномерным протаиванием сильнольдистого торфа и подземных льдов; в результате инъекции над центром жилы, торф, окружающий инъекцию, уплотняется и имеет большую плотность, чем на удалении. Торф в инъекции имеет меньшую плотность относительно вмещающих отложений, что связано с его разрыхлением во время выброса. 2) Нижний и верхний промежуточные слои имеют большую плотность ($0.91\text{--}1.0\text{ г/см}^3$) и льдистость и по сравнению с синкриогенным торфом (плотность $0.89\text{--}0.96\text{ г/см}^3$), что связано с наличием крупных включений льда. Формирование выделенных промежуточных слоев происходило за счет перехода нижней более увлажненной части СТС в мерзлое состояние. 3) Включения следующих типов льдов: сегрегационных, термокарстово-полостных, конжеляционных, инфильтрационно-сегрегационных, повторно-жильных, формирование которых связано с неравномерным в пространстве локальным термокарстом и сингенетическим промерзанием на фоне колебаний природных условий в голоцене [11]. Уменьшение ширины ледяных жил за счет протаивания сбоку и просадок торфа происходило при потеплении и/или увеличении количества осадков, затоплении поверхности полигональных торфяников. После возобновления промерзания морозобойным растрескиванием в результате похолодания климата или осушением поверхности на фоне аккумуляции торфа формируются ростки и продолжается рост полигонально-жильных льдов. В промежуточном слое в пределах полигонов сегрегационные льды, в основном, образуют линзовидную, слоистую шпировую (поясковую) криогенные текстуры, в отличие от синкриогенного торфа с массивной и корковой криогенными текстурами. 4) Промежуточный слой в межполигональных понижениях отличается большей льдистостью, размерами включений льда, наличием термокарстово-полостных льдов и верхних частей повторно-жильных льдов, а также большей амплитудой криотурбаций, по сравнению с криотурбациями в разрезах полигонов, обусловленными неравномерными просадками. В про-

межуточном слое полигонов выражены субгоризонтальные шпирь льда, параллельные рельефу кровли мерзлоты при переходе СТС в мерзлое состояние.

Вытаивание переходного слоя при сохранении тенденции современного потепления может привести к вытаиванию льдистого промежуточного слоя и утрате буферной роли для ММП.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволили установить признаки промежуточного слоя в торфяниках: криогенные текстуры, повышенная льдистость, включения льдов – сегрегационных, термокарстово-полостных, конжеляционных, инфильтрационно-сегрегационных и ростки полигонально-жильных льдов, а также выявить различия строения слоя в полигонах и межполигональных понижениях. Переходный слой на фоне потепления последних лет может быть выделен в результате многолетнего мониторинга глубины СТС, в мерзлом состоянии визуально отличается по желтовато-коричневому цвету и сегрегационным линзам льда.

По индикационным признакам в разрезах мерзлых торфяников можно выделять промежуточные слои – реликтовые буферные зоны, которые служат показателем изменений природных условий в полигональных системах ММП – температуры воздуха, увлажнения или затопления поверхности.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-55-11005 “Механизмы, траектории и пятнистость изменений арктических экосистем, вызванных потеплением климата” (КлимЭко) и № 19-45-890011 “Оценки устойчивости полигональных торфяников северной части Пур-Тазовского междуречья к антропогенному воздействию на фоне климатических изменений”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кашиперук П.И.* Типы и инженерно-геологические особенности многолетнемерзлых торфяных массивов севера Западно-Сибирской плиты / Автореф. дис. канд. геол.-мин. наук. М., 1985.
2. *Шур Ю.Л.* Верхний горизонт толщ мерзлых пород и термокарст. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-е, 1988. 213 с.
3. *Shur Y., Hinkel K.M., Nelson F.E.* The Transient Layer: Implications for Geocryology and Climate-change Science. Permafrost and Periglacial Processes 2005. 16. P. 5–17.
4. *Каверин Д.А., Мажитова Г.Г., Ривкин Ф.М., Пастухов А.В.* Исследование тундровых мерзлотных почв в системе “Деятельный слой многолетняя мерзлота” (северо-восток европейской России) // Изве-

- стия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. С. 52–58.
5. Мельников В.П., Спесивцев В.И. Криогенные образования в литосфере Земли (изобразительная версия). Новосибирск: НИЦ ОИГГМ СО РАН, Изд-во СО РАН, 2000. 343 с.
 6. Карта “Природных комплексов севера Западной Сибири” масштаба 1 : 1000000. Москва, 1991.
 7. Геокриология СССР. Западная Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 454 с.
 8. Украинцева Н.Г., Дроздов Д.С., Попов К.А., Гравис А.Г., Матышак Г.В. Ландшафтная индикация локальной изменчивости свойств многолетнемерзлых пород (Уренгойское месторождение, Западная Сибирь) // Криосфера Земли. 2011. Т. XV. № 4. С. 37–40.
 9. Хомутов А.В., Бабкин Е.М., Тихонравова Я.В., Хайруллин Р.Р., Дворников Ю.А., Бабкина Е.А., Каверин Д.А., Губарьков А.А., Слагода Е.А., Садуртинов М.Р., Судакова М.С., Королева Е.С., Кузнецова А.О., Факашук Н.Ю., Сощенко Д.Д. Комплексные исследования криолитозоны северо-восточной части Пур-Тазовского междуречья // Научный вестник ЯНАО. 2019. Т. 102. № 1. С. 54–64.
 10. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К. Мощные полигональные торфяники в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород Западной Сибири // Криосфера Земли. 2016. Т. 20. № 4. С. 3–15.
 11. Тихонравова Я.В. Особенности строения полигонально-жильных льдов севера Гыданского полуострова и Пур-Тазовского междуречья. / Автореф. ... дис. канд. геол.-мин. наук. Тюмень, 2019.
 12. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик.

IDENTIFICATION FEATURES OF THE TRANSITION AND INTERMEDIATE LAYERS IN POLYGONAL PEATLANDS OF THE NORTH OF WEST SIBERIA

E. S. Koroleva^{a,#}, E. A. Slagoda^a, Academician of the RAS V. P. Melnikov^{a,b}, E. A. Babkina^a,
A. V. Khomutov^a, O. L. Opokina^a, M. M. Danko^a, and Ya. V. Tikhonravova^c

^aEarth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Tyumen, Russian Federation

^bTyumen State University, Tyumen, Russian Federation

^cMelnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

[#]E-mail: koroleva_katy@inbox.ru

In the work considers the upper part of the subsurface component of the Earth’s cryosphere – polygonal peatlands are widespread in the permafrost zone. The icy transitional and intermediate layers in polygonal peatlands of the north of Western Siberia are a buffer zone during the thawing of permafrost in above under the influence of climatic fluctuations, so their identification is an urgent task. The characteristic features, the ratio with ice of different genesis and properties of peat these layers have determined. The differences in the structure of intermediate layer associated with the polygonal microrelief of surface are revealed. As result of monitoring of the seasonal thaw layer, thawing of the transitional layer was recorded against the background of modern warming. Indicators for identifying the transitional and intermediate layers – cryogenic structure, degree of preservation, color, humidity and density of peat has established.

Keywords: polygonal peatland, permafrost, transition layer, intermediate layer, climatic conditions