

На правах рукописи



КОРОЛЕВА
Екатерина Сергеевна

**РАЗВИТИЕ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОЛИГОНАЛЬНЫХ
ТОРФЯНИКОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИЗМЕНЕНИЙ
ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЙ ПУР-ТАЗОВСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ
ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

Специальность 1.6.7. Инженерная геология,
мерзлотоведение и грунтоведение

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Тюмень, 2022

Работа выполнена в Институте криосферы Земли – обособленном структурном подразделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра Сибирского отделения Российской академии наук (ИКЗ ТюмНЦ СО РАН).

Научный руководитель:

Слагода Елена Адольфовна, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник ИКЗ ТюмНЦ СО РАН

Официальные оппоненты:

Осадчая Галина Григорьевна, доктор географических наук, профессор кафедры экологии, землеустройства и природопользования Ухтинского государственного технического университета

Тумской Владимир Евгеньевич, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН

Ведущая организация:

ФГБУН Институт Геоэкологии РАН им. Е.М. Сергеева РАН

Защита состоится « 31 » мая 2022 г. в 10⁰⁰ ч. на заседании диссертационного совета 24.1.062.01 при ФГБУН Институте земной коры СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, конференц-зал

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИНЦ СО РАН (г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128) и на сайте: <http://www.crust.irk.ru/images/upload/newsfull205/3019.pdf>

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения) просим направить по указанному адресу ученому секретарю совета к.г.-м.н. Бабичевой Виктории Аркадьевне.
Тел: (3952)42-69-00, e-mail: khak@crust.irk.ru

Автореферат разослан « » апреля 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета кандидат геол.-мин. наук



В.А. Бабичева

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Реакция верхней части многолетнемерзлых пород на изменения природных условий на севере Западной Сибири относится как к фундаментальным, так и к важнейшим научно-практическим проблемам. В Арктике с конца XX века и до настоящего времени отмечают изменения погодных условий и активизацию целого ряда экзогенных геологических процессов, опасных для инженерных сооружений. В пределах субширотной полосы южной тундры и лесотундры широкое распространение имеют полигональные льдистые торфяники, которые в холодные периоды прошлого века обеспечивали устойчивое состояние верхней части мерзлых толщ. Повышение среднегодовых температур воздуха в последние годы привело с одной стороны к протаиванию и просадкам льдистых торфяников, вытаиванию полигонально-жильных систем, термоэрозии и термокарсту, заболачиванию и росту заозеренности торфяных массивов, с другой стороны к неравномерному криогенному пучению, что осложняет функционирование линейных сооружений. Геокриологические исследования торфяников в последние годы были направлены на решение инженерно-геологических и экологических задач: прогнозу увеличения глубины протаивания при повышении летних температур воздуха. Меньше внимания уделялось палеогеографическим проблемам. Недостаточная изученность строения, свойств мерзлого и талого торфа осложняет оценку тенденций изменения состояния мерзлых пород и развития рельефа в южной тундре и лесотундре. Необходим анализ связей свойств и строения торфа с определяющими их факторами: геокриологическими условиями, процессами и изменениями климата последних лет.

Проблемами при изучении торфяников криолитозоны является выделение защитной (буферной) зоны для верхней части мерзлоты, которой служат переходный и промежуточные слои, а также реакции микрорельефа поверхности на изменения природных условий. Не решены вопросы о критериях для выделения переходного слоя, признаках промежуточного слоя в торфе и последствиях деградации защитной зоны в торфяниках. С неоднозначной реакцией верхней части мерзлой толщи на изменения климата связаны вопросы формирования криотурбаций в мощных полигональных торфяниках, процессы и механизмы образования органических пятен-медальонов, а также последствия их развития. Выделение промежуточного и переходного слоев в голоценовых

горизонтах торфа имеет важное значение для решения палеогеографических задач.

Цель исследования: установить особенности строения, свойств и микрорельефа полигональных торфяников в связи с изменениями природных условий на примере Пур-Тазовского междуречья.

Задачи исследования:

- 1) Провести обзор материалов исследований торфяников в Западной Сибири, обстановок их формирования, методов изучения и влияния на состояние многолетнемерзлых пород;
- 2) Изучить разрезы полигональных торфяников на ключевых участках; установить признаки переходного и промежуточного слоев, выделить их в разрезах; выявить особенности криогенного строения и определить физико-механические свойства торфа;
- 3) Установить строение и распространение органических пятен-медальонов; определить их свойства и связь с деградацией переходного и промежуточного слоев;
- 4) Разработать феноменологическую модель стадийного развития органических пятен-медальонов.

Фактический материал и личный вклад. Автором в составе четырех экспедиций ИКЗ ТюмНЦ СО РАН в районе Пур-Тазовского междуречья Западной Сибири в 2018-21 гг собран фактический материал: описаны рельеф и криогенное строение полигональных торфяников, собраны пробы и монолиты торфа для определения влажности, плотности; льдов для структурно-текстурного анализа. Выполнены лабораторные исследования образцов торфа и льда, проведена интерпретация полученных результатов и предложена феноменологическая модель развития органических пятен-медальонов.

Достоверность результатов исследования подтверждена методической базой, основанной на фундаментальных теоретических положениях общей геокриологии, физики, механики грунтов и инженерной геологии, достаточным объемом данных в соответствии с нормативными документами. Выполнены определения свойств талого и мерзлого торфа: влажность - 206, плотность - 209, сопротивления сдвигу - 6; петрографический анализ четырех типов льда в 8 шлифах. Визуальные данные, полученные посредством съемки с беспилотного летательного аппарата (БПЛА), подтверждены маршрутными исследованиями.

Защищаемые положения:

- 1) В полигональных торфяниках в переходном слое формируется большая плотность скелета торфа по сравнению с промежуточным слоем

вследствие процессов промерзания-протаивания и сегрегационного льдовыделения. В промежуточных слоях торфяников развиты криотурбации и сформирована неравномерно повышенная льдистость за счет неровной кровли многолетнемерзлых пород. Эти параметры переходного и промежуточного слоев образуют вертикальную и горизонтальную неоднородности физических свойств и строения торфа в массиве.

2) Органические пятна-медальоны, развивающиеся в полигональных торфяниках Пур-Тазовского междуречья Западной Сибири, формируются в теплые периоды при увеличении глубины протаивания сезонно-талого слоя, роста давления в замкнутой полости между кровлей мерзлых пород и талым торфом и последующего прорыва органической разжиженной массы на поверхность.

3) Ведущим процессом образования органических пятен-медальонов в торфяниках является оттаивание переходного и промежуточного слоев в верхней части разреза мерзлых грунтов.

Научная новизна:

1) Впервые установлены признаки промежуточного слоя в полигональных торфяниках Пур-Тазовского междуречья. К ним относятся линзовидные и слоистые криогенные текстуры, повышенная льдистость, криотурбации, включения льдов: сегрегационных, термокарстово-полостных, инфильтрационно-сегрегационных и ростки полигонально-жильных льдов.

2) Впервые выделены два промежуточных слоя в массиве голоценового полигонального торфяника, сформированные в похолодания суббореального (4,87-3,84 т.л.н.) и субатлантического периодов (1,4-1,2 т.л.н.).

3) Впервые доказано излияние органических пятен-медальонов на поверхность в теплые сезоны.

Теоретическая и практическая значимость.

Развитие представлений о буферной зоне для многолетнемерзлых пород в мощных полигональных торфяниках и формировании органических пятен-медальонов важно для развития геокриологии в области наук о Земле.

Основа для прогноза реакции криолитозоны - это климатические параметры, ландшафтные условия и строение разрезов. Дифференцированную реакцию торфяников в крупном масштабе определяют строение переходного и промежуточных слоев, а также наличие органических пятен-медальонов. Результаты могут быть

использованы для обеспечения рационального природопользования в Арктике при проектировании и строительстве линейных сооружений в хасырях на льдистых торфах, а также в курсах лекций для студентов геологического, географического и экологического направлений.

Апробация результатов. Результаты исследований доложены и обсуждались: на научно-практических семинарах в ТюмНЦ СО РАН; на международной конференции «Криосферные ребусы» (Пушино, 2019); на национальной научно-практической конференции «Нефть и газ: технологии и инновации» (Тюмень, 2019); на всероссийской молодежной конференции «Строение литосферы и геодинамики» (Иркутск, 2021) и VI всероссийском научном молодежном геокриологическом форуме «Актуальные проблемы и перспективы развития геокриологии» (Якутск, 2021). Результаты исследований опубликованы в 4-х статьях периодических изданий из перечня ВАК.

Объем и структура работы. Работа состоит из введения, трех глав, заключения и приложения. Содержит 136 страниц, 57 рисунков, 13 таблиц. Список цитирований содержит 105 источников, из них 12 на английском языке.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю главному научному сотруднику ИКЗ ТюмНЦ СО РАН д.г.-м.н. Е.А. Слагоде и д.г.н. В.В. Рогову за привитый интерес к науке, за веру и помощь в подготовке диссертации. Автор благодарна к.г.-м.н. А.В. Хомутову и сотрудникам лаборатории «Комплексных исследований криогенных процессов и криотрасологии» за всестороннюю помощь в экспедициях и поддержке всех идей.

ГЛАВА 1. МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫЕ ТОРФЯНИКИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

1.1. Геолого-геоморфологическая приуроченность, мощность и типизация торфяников

Дано описание торфяных массивов в Западной Сибири, которые местами занимают до 80% площади геоморфологических элементов поверхности, в многолетнемерзлом состоянии находится около 50%. Типы торфяных массивов выделены по генезису и морфологическим особенностям: площади, форме элементов микрорельефа, высоте, наличию полигонального микрорельефа. Полигональные торфяники включают три вида: валиково-полигональный с мощностью торфа 0,5-5,1 м, плоско-полигональный – 0,5-3,0 м и бугристо-полигональный – 0,5-6,5 м.

1.2. История исследований торфяников

Интерес к торфяникам возник с начала XVIII века и был связан с их использованием в качестве топлива. С конца первой половины XX века основные исследования торфяников проводились Н.Я. Кацом, М.И. Нейдштадтом, В.Т.Трофимовым, П.И. Кашперюком, О.Л. Лиссом, Ю.К. Васильчуком, и др. Изучались инженерно-геокриологические условия, видовое разнообразие растительности, возраст и изменения природных условий при их формировании.

1.3. Переходный и промежуточные слои верхней части многолетнемерзлых пород

Рассмотрены современные представления о переходном и промежуточном слоях. Переходный слой – зона максимального оттаивания в наиболее теплые годы. В эти годы он является нижней частью сезонноталого слоя (СТС), ежегодно не оттаивает и не менее трех лет находится в мерзлом состоянии, выполняет защитную роль для многолетнемерзлых пород (ММП). Промежуточный слой отнесен к верхней части ММП, является реликтовым переходным слоем, фиксирующим увеличение глубины СТС за счет изменения ландшафтно-фациальной обстановки или более продолжительного периода потепления. Ю.Л. Шур (1988) выделил переходный и промежуточный слои в минеральных грунтах, определил их признаки: криогенные текстуры и относительную однородность в горизонтальном направлении. Выделение переходного и промежуточного слоев в торфяниках не проводилось.

1.4. Минеральные и органические пятна-медальоны в полигональных системах

Органические пятна-медальоны - скопления тонкодисперсной органической массы без растительности, округлые и вытянутой формы; выполняют понижения микрорельефа и обрамлены кочками на поверхности торфяников. Подобные пятна-медальоны выявлены Г.В. Матышаком, Д.И. Кавериним и др. в торфяниках севера Западной Сибири и Европейского севера. Механизм образования пятен-медальонов в торфе не имеет однозначного объяснения, в отличие от минеральных пятен-медальонов, у которых ведущий процесс - промерзание.

Обзор исследований полигональных торфяников показал, что в Западной Сибири переходный, промежуточные слои и органические

пятна-медальоны мало изучены для выделения в разрезах, не определен механизм формирования органических пятен-медальонов.

Глава 2. ПЕРЕХОДНЫЙ И ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ СЛОИ В ТОРФЯНИКАХ ПУР-ТАЗОВСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ И ИХ РЕАКЦИЯ НА ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЙ

2.1. Геокриологические условия Пур-Тазовского междуречья

Район исследования расположен на северо-востоке Западной Сибири вблизи с. Газ-Сале и п. Тазовский (рис.1, А).

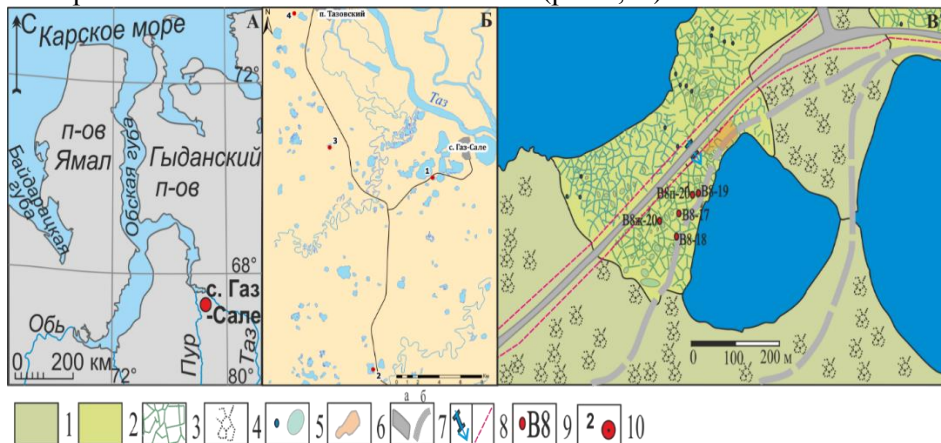


Рис.1. Район исследования (А), схема расположения ключевых участков (Б), схема расположения разрезов на ключевом участке 1 (В). Условные обозначения: 1 - водораздел; 2 - хасыреи; 3 - полигональный рельеф в низинах; 4 - полигональный рельеф на возвышенностях; 5 - полигональные ванны и обводненные просадки; 6 - зона пожара; 7 - дорога и заросшие колеи; 8 - водопропускная труба и границы насыпи и придорожных понижений; 9 - номера разрезов; 10 - места ключевых участков

ММП имеют двухслойное строение (первый слой залегает сверху до глубины 250 м, второй – в интервале 340-395 м). Полигональные торфяники в районе исследований распространены преимущественно в хасырях, термокарстово-эрозионных ложбинах с остаточными озерами, на поймах старичных озер, малых рек и ручьев. К торфяникам Пур-Тазовского междуречья приурочены полигонально-жильные льды более 4 м по вертикали. Я. В. Тихонравова и др. (2017) отмечают, что эти повторно-жильные льды (ПЖЛ) отличаются гетерогенным строением,

которое связано с локальным термокарстом в ходе сингенетического промерзания озерно-болотных отложений в голоцене.

На площадках мониторинга Пур-Тазовского междуречья в хасырях с полигональными торфяниками, в 2016 г углубление СТС (от 0,53 до 0,56 м) на всех элементах рельефа было обусловлено аномально теплым и сухим летним сезоном. В последующие 2017-19 годы глубина СТС достигла средней величины 0,49 м при продолжительности теплого сезона 124-144 дня. 2020 г отличался самым длительным за 5 лет теплым сезоном – 153 дня, глубина СТС на полигонах увеличилась до 0,58-0,59 м, в межполигональных понижениях – 0,51 м вследствие просадок торфа и частичного вытаивания льдов.

2.2. Методы изучения торфяников

Раздел посвящен полевым и аналитическим методам изучения строения и свойств торфяников, которые проведены в соответствии с нормативными документами. Ключевые участки исследований в южной тундре и лесотундре были выделены при анализе космоснимков и в маршрутах; описан рельеф полигональных торфяников, произведена документация разрезов, керн скважин. Аналитическими методами определены физико-механические свойства торфа, растительные остатки, проведен структурно-текстурный анализ льдов.

2.3. Криолитологическое строение торфяников ключевых участков Пур-Тазовского междуречья Западной Сибири

В разделе представлено строение разрезов торфяников на ключевых участках (рис. 1, Б) в пределах полигонов и межполигональных понижений и связанных с ним льдов разного генезиса. Установлены криогенное строение и физические свойства торфа, типы торфяных залежей по составу растительности.

В разрезе **В8п-20** в центральной части полигона на ключевом участке 1 (рис. 1, В) вскрыты снизу вверх (рис. 2, А):

Слой 1 [2,0-0,5м] – торф автохтонный, черный, рыхлый, из мхов с корнями осоки, слоистый за счет чередования мхов, корней, стеблей растений. Торф с глубины 0,75 м мерзлый с корковыми, массивными криогенными текстурами и горизонтально-волнистыми шлирами льда мощностью 0,5-1,5 см на глубине 0,8-1,3 м (по данным 2019 г. в расчистке В8-19), 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.

Слой 2 [0,25-0,5 м] – торф плотный, коричневый, из разложенных растительных остатков. Влажность меняется от 299 до 342%; плотность – 0,94-0,99 г/см³.

Слой 3 [0,05-0,25 м] – переслаивание слоев и линз торфа рыхлого рыже-коричневого и плотного темно-коричневого. Толщина прослоев от 1 до 8 см, преобладают рыхлые; слоистость, в целом, повторяет рельеф поверхности полигона: мелковолнистая, плавная с затеками и просадками - криотурбациями. Влажность торфа меняется от 355 до 462%; плотность – 0,84-0,86 г/см³.

Слой 4 [0-0,05] – мохово-растительный слой, представленный рыхлым зеленым и серым отмершим мхом, внизу с корнями багульника и морошки.

Разрез В8ж2-20 (рис. 1, В) в межполигональном понижении шириной более 2,5 м, видимая мощность 1,5 м над крупной ледяной жилой вскрыл снизу вверх (рис. 2, Б):

Слой 1 [1-1,5 м] – торф мерзлый, льдистый, рыхлый, автохтонный из мхов, стеблей трав, веточек кустарничков с массивными и корковыми криогенными текстурами. Влажность мерзлого торфа от 558 до 1050%, плотность 0,89-0,94 г/см³; влажность торфа около термокарстово-полостного льда от 1015 до 1842%, плотность от 0,93 до 0,98 г/см³.

Слой 2 – торф плотный, коричневый, талый, из разложенных растительных остатков, залегает в боковых стенках расчистки под полигоном и выклинивается над жилой.

Слой 3 [0,2-1 м] – переслаивание линз и прослоев торфа из мхов темно-оранжевого рыхлого и темно-коричневого плотного, мощность линз и прослоев 2-10 см. С глубины 0,4 м торф мерзлый с горизонтально-волнистыми шпирями льда мощностью от 1 до 3 см, корковыми, линзовидными и массивными криотекстурами, выше талый. Криотурбации в слое образованы волнистой плавной слоистостью, затеками и просадками, и инъекцией рыхлого торфа над центром жилы. Мерзлый темно-оранжевый торф имеет влажность от 599 до 4383%, его плотность изменяется 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 0,81-0,9 г/см³. Нижняя граница слоя неровная.

Слой 4 [0-0,2 м] – мохово-растительный слой представлен рыхлым мхом, лишайниками и отмершими серыми прослоями мхов с корнями.

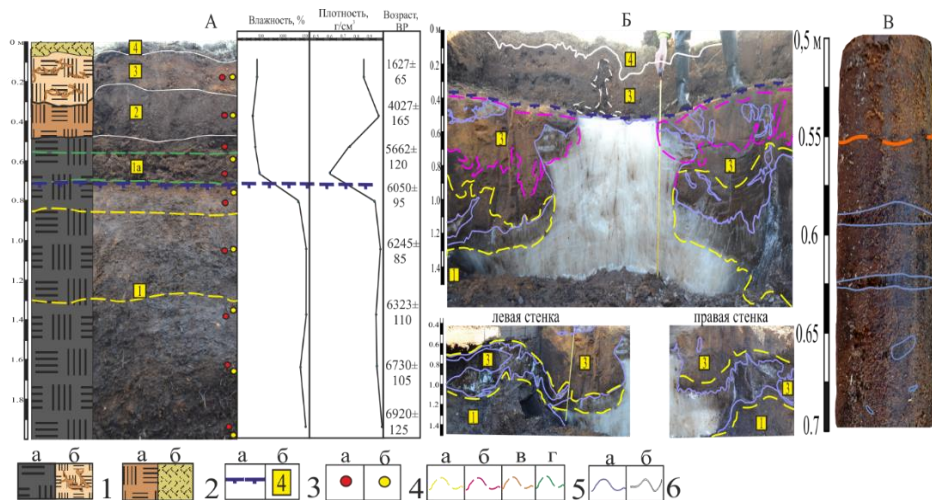


Рис. 2. Криолитологическое строение разреза В8п-20 (А); разреза В8ж2-20 (Б); керн скважины (В). Условные обозначения: 1 (а, б) – 2 (а, б) – торф слоев 1-4 (описание см. в тексте); 3а - кровля многолетнемерзлых отложений; 3б - номер слоя; 4 – места отбора торфа на плотность и влажность (а), на возраст (б); 5 – верхний промежуточный слой (а), нижний промежуточный слой (б); переходный слой (в); оттаявшие отложения верхнего промежуточного слоя (г); 6 – границы термокарстово-полостных и сегрегационных льдов (а); границы слоев (б).

В разрезе торфяника выделены полигонально-жильный, термокарстово-полостной, инфильтрационно-сегрегационные и сегрегационный льды. Жила вертикально-полосчатого пузырьчатого льда с симметричными плечиками имеет видимый вертикальный размер 1,2 м. Ее ширина по кровле составляет 0,6 м, на уровне верхних плечиков - 1,1 м, на уровне нижних плечиков - 2,6 м. На верхние и нижние плечики жилы наложены линзы прозрачного стекловатого с пузырьками воздуха термокарстово-полостного льда мощностью до 20 см и инфильтрационно-сегрегационного льда. К нижним плечикам жилы и линзам льда примыкают изогнутые шпилы льда толщиной 10-11 см, залегающие в торфе полигона на глубине 0,85-1,15 м.

2.4. Типы льдов в полигональных торфяниках

Для определения разнообразия криогенного строения торфа представлен структурно-текстурный анализ 4 типов льдов: полигонально-жильного, термокарстово-полостного, шлиров сегрегационного и инфильтрационно-сегрегационного льда.

2.5. Признаки и образование переходного и промежуточных слоев в полигональных торфяниках Пур-Тазовского междуречья Западной Сибири под воздействием изменения природных условий

Одним из критериев выделения **переходного слоя** могут быть результаты мониторинга не менее чем за последние 5 лет (раздел 2.1.). В торфяниках Пур-Тазовского междуречья переходный слой средней мощностью 0,07 м был выделен в интервале глубин 0,51-0,58 м за период наблюдений в 2016-2020 гг. В межполигональных понижениях переходный слой плохо выделяется визуальными и аналитическими методами. В разрезе полигона переходный слой выделен только в мерзлом керне по желтовато-коричневому цвету торфа (дата бурения скважины 16-18 сентября 2020 г) (рис. 2, В).

В разрезах торфа межполигональных понижений выделено два промежуточных слоя: 1) нижний в интервале глубин – 0,8-1,3 до 1,5 м, вложен в крупные плечи ПЖЛ; 2) верхний – 0,55-0,8 м, вложен в мелкие плечики ПЖЛ (рис. 2, Б).

Оттаявшие отложения верхнего промежуточного слоя в разрезах полигонов были выделены в рыхлом торфе в интервалах глубин 0,55-0,75 м (рис. 2, А), в мерзлом состоянии по наличию шлиров льда толщиной до 0,5-1,5 см в скважине в центре полигона – 0,55-0,7 м (рис. 2, В).

Нижний промежуточный слой в разрезах стенок полигонов мало отличается от синкриогенного торфа по влажности и плотности, поскольку шлиры и текстурные льды частично вытаяли в открытой стенке полигона в промоине за длительный теплый сезон 2020 г. Этот слой выделен в скважине на глубине 0,85-1,3 м (по наличию шлиров льда до 3 см), по схожему криогенному строению, резкому уменьшению ширины ПЖЛ над крупным плечиками в разрезе В8-19.

Промежуточные слои включают ростки ПЖЛ сегрегационные, термокарстово-полостные, инфильтрационно-сегрегационные льды и криотурбации, формирование которых связано с неравномерным в пространстве локальным термокарстом и сингенетическим промерзанием, обусловленным колебаниями природных условий в

голоцене. Промежуточные слои в массиве голоценового полигонального торфяника, по-видимому, образовались в похолодания суббореального (4,87-3,84 т.л.н.) и субатлантического периодов (1,4-1,2 т.л.н.).

Для переходного и промежуточного слоев были определены влажность и плотность торфа (табл.1) (Королева и др., 2021). Прочностные характеристики мерзлого торфа изменяются незначительно в среднем от 0,95 до 1 г/см³. При этом значительно изменяются влажностные характеристики торфа. Незначительные на первый взгляд изменения в плотности мерзлого торфа связаны с разным соотношением содержания льда и органического материала.

Табл.1 Свойства торфа переходного и промежуточного слоев в мерзлом и оттаявшем состояниях

	Полигон		Межполигональное понижение	
	Влажность, %	Плотность, г/см ³	Влажность, %	Плотность, г/см ³
Переходный слой	724-837	0,96		
Верхний промежуточный слой	1131-1279	0,95-0,97	537-5430*	0,91-1
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

*торф рядом с ПЖЛ и шлирами льда

При высоких значениях влажности величина плотности определяется большим количеством льда. При более низких значениях влажности плотность зависит от содержания органики. Особенно ярко изменения свойств скелета грунта проявляют себя на контактах разных типов торфа (темно-оранжевого рыхлого и темно-коричневого плотного) со шлирами льда. В промежуточных слоях уплотнение скелета торфа при сегрегационном льдовыделении происходит за счет миграции влаги к фронту промерзания, увеличения объема льда и выделении газа из нижележащего торфа. В переходном слое уплотнение скелета торфа происходит за счет циклического промерзания-протаивания. Эти процессы формируют вертикальную неоднородность плотности скелета грунта.

В Тюменском индустриальном университете в шлирах сегрегационного льда промежуточного слоя этих разрезов торфа были

определены высокие содержания (6,7% от объема льда) биогенных - CH_4 , CO_2 , H_2 и атмосферных газов.

Глава 3. ОРГАНИЧЕСКИЕ ПЯТНА-МЕДАЛЬОНЫ – ЭЛЕМЕНТ СТРОЕНИЯ ПОЛИГОНАЛЬНЫХ ТОРФЯНИКОВ ПУРТАЗОВСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

3.1. Морфология и распространение органических пятен-медальонов

Органические пятна-медальоны (рис. 3), сложенные тонкодисперсной органической массой, распространены в торфяниках, формируются в пределах сезонноталого слоя, глубина которого неравномерно менялась за период наблюдений СТС, и захватывают оттаявшие переходный и частично промежуточный слои, а также локально - синкриогенный торф ММП. Органические пятна-медальоны распространены на выпуклых, плоских, вогнутых полигонах с валиками, редко на широких плоских межполигональных понижениях и в широких заросших колеях вездеходов.

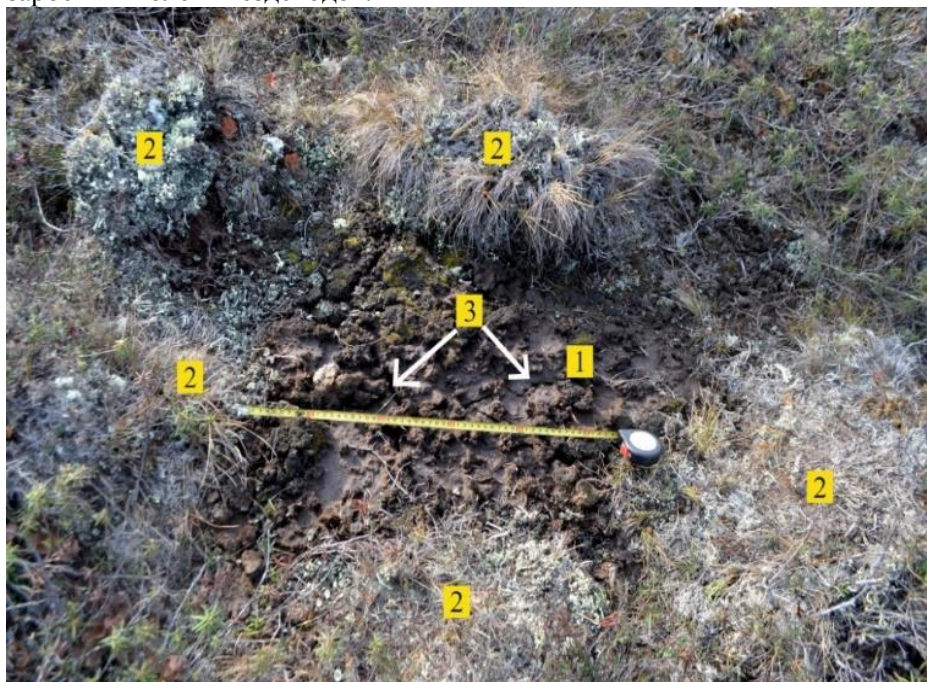


Рис. 3. Органическое пятно-медальон. Условные обозначения: 1 – органическое пятно-медальон, 2 - кочки, 3 - трещины высыхания

3.2. Строение и свойства органических пятен-медальонов в разрезах

В пределах полигона на ключевом участке 2 шурф В12-16 глубиной 0,7 м вскрыл органическое пятно-медальон, которое имеет характерное строение для большинства подобных образований. В шурфе был отмечен резкий и сильный застойный гнилостный запах. Снизу вверх выделены слои торфа (рис.4, А, Б.):

Слой 1 [0,55-0,7 м] – торф черный, неразложенный, из целых стеблей мхов со стволиками деревьев диаметром 5-7 см. С глубины 0,5-0,6 м мерзлый, характеризуется высокой льдистостью, массивной криотекстурой и корковой вокруг древесных остатков. Кровля ММП имеет вогнуто-чашеобразную форму, ее снижение между кочками достигает 10 см.

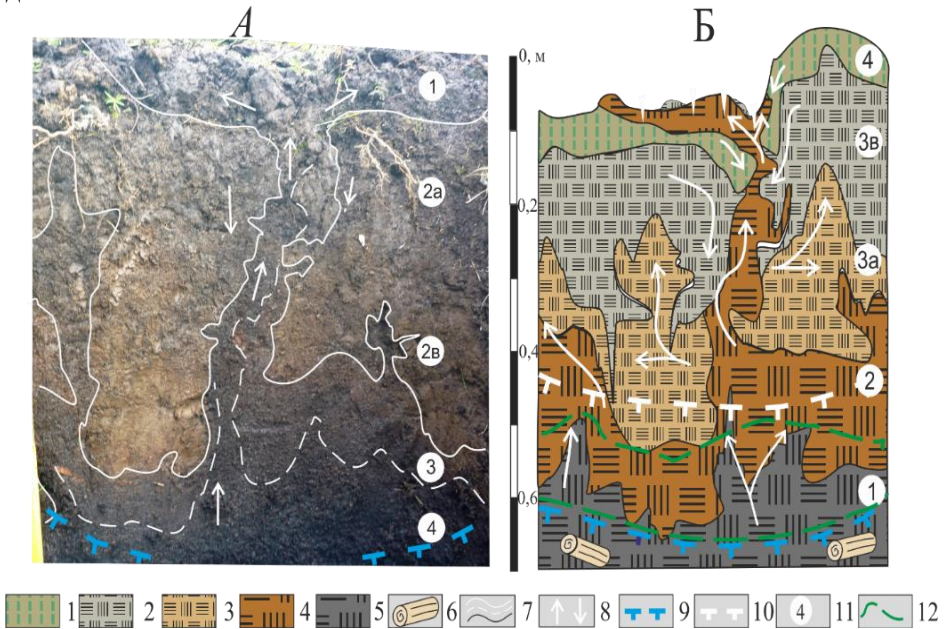


Рис. 4. Разрез В12-16 пятна-медальона на фотографии (А), схема строения торфа в СТС и направления перемещения органического материала (Б) 1-5 - слои торфа (см. описание в тексте); 6 - древесные остатки; 7 - границы слоев; 8 – современная граница ММП; 9 - реликтовая граница ММП; 10 - направление инъекции и перемещения органического материала; 11 - номер слоя; 12 - оттаявшие отложения переходного и промежуточного слоев

Слой 2 [0,45-0,55 м] – торф коричневатого-черный, рыхлый, влажный, с волнистой слоистостью, за счет смещения слоев в результате пучения (смещение ~ 0,1 м). Органические отложения представлены неразложившимися мхами, кустарничками и внедрениями инъекций черного торфа из слоя 1.

Слой 3 [0,07-0,45 м] – торф разложившийся, плотный, коричневатого-серого (3а) и светло-коричневого цветов (3в). Разложившийся светло-коричневый торф (3в) с глубины 0,2-0,4 м имеет потерю массы при прокаливании 89%, содержание золы - 11%. Слой разорван внедрениями черного и коричневого торфа слоев 1, 2.

Слой 4 [0-0,07 м] – почвенно-растительный слой с кустарничково-мохово-лишайниковой растительности, перекрытый черной органической массой слоев 2 и 3 толщиной 3-7 см [Королева и др., 2019].

Контакты слоев всех разновидностей разложившегося и рыхлого торфа неровные, они подчеркивают строение инъекции – направление выброса неразложившегося и слабо разложившегося торфа слоев 1, 2 на поверхность (рис. 4, Б). Несколько инъекций в одном месте, но в разные годы приводит к слиянию пятен-медальонов и увеличению их размеров.

Основным показателем вертикальной неоднородности разреза СТС является высокое значение плотности скелета отложений слоя 3 – 0,14-0,32 г/см³ для всех ключевых участков.

3.3. Феноменологическая модель образования органических пятен-медальонов

Для полигональных торфяников опорных участков получены оптические данные дистанционного зондирования - съемки с БПЛА за 2 временных периода (30 июня и 15 сентября 2019 г.), в начале и в конце теплого сезона (рис. 5).

Материалы съемок обработаны в программе Agisoft Metashape Professional и представлены в виде ортофотопланов с разрешением ~ 0,02 м. Были выявлены новообразованные пятна-медальоны. Наличие пятен-медальонов на сентябрьских данных с БПЛА и их отсутствие на более ранних июльских однозначно указывает на формирование органических пятен-медальонов именно в летний период между датами съемки. На основании полученных материалов установлено, что органические пятна-медальоны в изученных полигональных торфяниках были образованы и продолжают формироваться в теплые сезоны года.

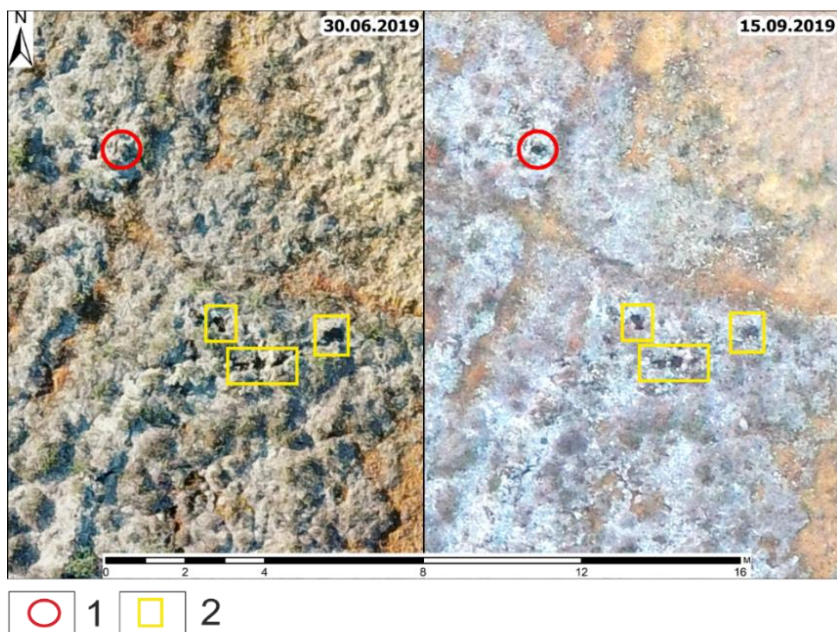


Рис.5. Фрагменты ортофотопланов, построенных на основе съемок с БПЛА для ключевого участка № 4. Условные обозначения: 1 - органические пятна-медальоны, которые появились в теплый сезон 2019 года; 2 - старые органические пятна-медальоны

Образование органических пятен-медальонов в понижениях микрорельефа поверхности может быть объяснено следующими процессами и особенностями строения и свойств торфа в СТС. В результате многолетних циклов промерзания и оттаивания в пределах СТС в годы, предшествующие потеплению климата, произошло разложение органики, ее сильное уплотнение и образование криотурбаций торфа (рис. 6, А).

Зимой в результате пучения кочек или возвышенных частей валиков полигонов происходило относительное понижение поверхности между ними. На фоне современного повышения летних температур воздуха при протаивании в понижениях поверхности происходило и происходит увеличение глубины СТС - локальное углубление кровли ММП (рис. 6, Б). Из-за увеличения глубины СТС на 9-20 см по сравнению с периодом похолодания прошлого века, произошло частичное оттаивание неразложенного

торфа переходного слоя 2, промежуточного слоя над синкриогенным торфом слоя 1 и синкриогенного торфа слоя 1 (рис. 6, Б). Малая мощность СТС, отсутствие воды в неглубоких понижениях и небольшой вес покровного торфа не могут обеспечить внешние условия для роста давления над кровлей ММП, и излияния, выброса или выдавливания органической массы на поверхность. Основной причиной образования инъекции в теплый сезон могло быть увеличение давления в замкнутой системе в локальном углублении в кровле мерзлоты и под уплотненным разложенным торфом слоя 3.

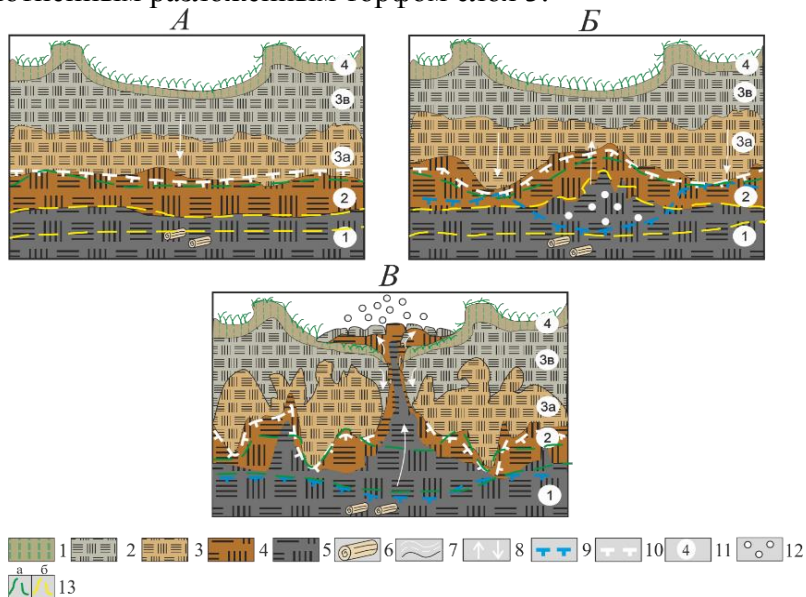


Рис. 6. Схема образования инъекций и органических пятен медальонов в теплый сезон года без участия промерзания. Условные обозначения: 1-5 - слои торфа (см. описание в тексте); 6 -древесные остатки; 7 - границы слоев; 8 - направление инъекции и перемещения органического материала; 9 - современная граница ММП; 10 - реликтовая граница ММП;11 - номер слоя; 12 - пузырьки газа; 13 - переходный и промежуточный слои (а); талые отложения переходного и промежуточного слоев (б).

В талом торфе промежуточного слоя и слоя 1 выделялся газ за счет жизнедеятельности микроорганизмов в свежееоттаяших

неразложившихся растительных остатках. На активизацию и «взрывной рост» законсервированных бактерий, выделение и накопление парниковых газов при понижении кровли мерзлоты указывали исследования в Восточной Сибири. Как показано в разделе 2.5 шпирь сегрегационного льда имеют повышенные 6,7% от объема льда биогенных - CH_4 , CO_2 , H_2 и атмосферных газов. Газ накапливался под плотным, вязко-пластичным торфом слоя 3 в замкнутой системе, которая формировалась в рыхлом слое 2, над локальным углублением кровли мерзлоты, образовавшемся при оттаивании промежуточного слоя. Выделения газа происходило из промежуточного слоя и шпиров льда, которые существовали на контакте СТС и ММП (рис. 6, Б). Торф слоя 3 служил крышкой ловушки для газов, накопившихся в торфе слоя 2. Судя по невысоким значениям сопротивления сдвигу слоя 3 (удельное сцепление: 0,009-0,014; угол внутреннего трения: 10-22°) при накоплении газов под ним в замкнутой ловушке возникает давление, достаточное для разрыва этого слоя и излияния газо-водонасыщенной органической массы на поверхность.

Под давлением накопившегося газа в слое 2, слой 3в приподнимался, сдвигая вверх вышележащие слои. При достижении критического давления (за счет продолжающегося накопления газа) в результате растягивающих напряжений в слабой зоне происходит разрыв слоев 3а и 3в, излияние слоев 2, 3 и 1 на поверхность (рис. 6, В). Следовательно, выделение газа в торфе в понижениях кровли мерзлоты, по-видимому, провоцирует инъекции органо-минеральной массы, по форме подобные минеральным пятнам-медальонам, но первоначально их формирование происходит на фоне протаивания, неравномерного углубления СТС и не связано с его промерзанием, как в минеральных пятнах-медальонах.

3.4. Влияние органических пятен-медальонов на рельеф полигональных торфяников и экологические последствия

В полигональных торфяниках южной Тундры Пур-Тазовского междуречья за последние 5 лет происходило постепенное затемнение поверхности за счет органических пятен-медальонов, что может приводить к снижению кровли и увеличению температуры многолетнемерзлых пород за счет отсутствия растительного покрова и большего прогрева поверхности. При этом происходит увеличение площадей органических пятен-медальонов, что приводит к снижению поверхности и выравниванию микрорельефа полигонов торфяников, и их

заболачиванию. Сниженная поверхность полигональных торфяников может привести к затоплению и расширению площади акватории мелководных озер, при затоплении термоэрозионных промоин может увеличиться изрезанность береговых уступов озер. При сохранении современных тенденций изменения климата под озерами могут активизироваться термокарстовые процессы, а в хасырях термоэрозионные, что, вероятно, вызовет дальнейшую перестройку рельефа поверхности полигональных торфяников.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования в торфяниках Пур-Тазовского междуречья позволили установить буферную зону ММП, которая включает промежуточный и переходный слой, криотурбации, образовавшиеся на фоне неравномерного снижения глубины СТС под воздействием колебаний природных условий. Предложен механизм образования органических пятен-медальонов в летний период без участия промерзания.

1) Формирование переходного и промежуточных слоев в полигональных торфяниках связано с изменениями природных условий в голоцене. Переходный слой в полигональных торфяниках на фоне потепления последних лет можно выделить в результате мониторинга глубины СТС. В мерзлом состоянии он визуально отличается желтовато-коричневым цветом.

2) Промежуточные слои в торфяниках характеризуются следующими признаками: линзовидными и слоистыми криогенными текстурами, повышенной льдистостью, включениями сегрегационных, термокарстово-полостных, инфильтрационно-сегрегационных льдов, ростками ПЖЛ, а также повышенным содержанием газа в сегрегационных льдах и в торфе. Установлены различия строения слоя в полигонах и межполигональных понижениях, которые связаны с неровной кровлей ММП. Промежуточные слои в межполигональных понижениях отличаются большей льдистостью, размерами включений льда, наличием термокарстово-полостных льдов и криотурбаций, обусловленных неравномерными просадками. В промежуточных слоях полигонов выражены субгоризонтальные шпирь льда, параллельные рельефу кровли мерзлоты, образованные при переходе СТС в мерзлое состояние. По этим признакам в мерзлых голоценовых торфяниках можно выделять реликтовые промежуточные слои, которые служат показателем изменений природных условий: температуры воздуха,

увлажнения или затопления поверхности. Впервые выделены два промежуточных слоя в массиве голоценового полигонального торфяника, которые образовались в похолодания суббореального (4,87-3,84 т.л.н.) и субатлантического периода (1,4-1,2 т.л.н.).

3) Изменения в плотности торфа связаны с разным соотношением содержания льда, степени дезинтеграции и плотности скелета органического материала. Плотность скелета торфа переходного слоя больше по сравнению с промежуточными слоями. Формирование вертикальной неоднородности плотности скелета грунта происходит за счет образования сегрегационных шлиров, увеличения объема льда, миграции влаги к фронту промерзания и диффузии газа из нижележащего торфа вследствие многократных циклов промерзания-протаивания.

4) Органические пятна-медальоны в торфяниках Пур-Газовского междуречья формируются в теплые периоды. Предложена феноменологическая модель развития органических пятен-медальонов, которая предполагает следующую последовательность событий: увеличение мощности сезонноталого слоя; пучение, просадки с образованием криотурбаций; накопление газа в обводненном торфе в замкнутой полости между кровлей мерзлых пород и плотным талым торфом; при достижении критического давления - разрыв плотного торфа и излияние водно-газо-торфонасыщенной смеси на поверхность.

5) Ведущим процессом образования органических пятен-медальонов в торфяниках является оттаивание переходного и промежуточного слоев в верхней части разреза мерзлых грунтов.

6) Органические пятна-медальоны могут служить индикатором неравномерного локального понижения кровли многолетнемерзлых пород на фоне повышения летних температур в полигональных торфяниках.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Королева Е.С., Слагода Е.А., Мельников В.П., Бабкина Е.А., Хомутов А.В., Опокина О.Л., Данько М.М., Тихонравова Я.В. Идентификационные признаки переходного и промежуточного слоев в полигональных торфяниках севера Западной Сибири // Доклады Российской академии наук. Науки о земле. 2021, том 498, № 2, с. 131-137.

2. Королева Е.С., Бабкина Е.А., Слагода Е.А., Хомутов А.В., Мельников В.П., Бабкин Е.М., Тихонравова Я.В. Индикаторы локальных изменений

сезонного протаивания с применением беспилотных летательных аппаратов для картографирования криолитозоны // Доклады Российской академии наук. Науки о земле. 2020, том 491, № 1, с. 87-91

3. Королева Е.С., Слагода Е.А., Бабкина Е.А., Бабкин Е.М., Тихонравова Я.В., Факашук Н.Ю. Структурно-текстурные особенности генетических типов пластовых и жильных льдов и условия их образования в низовьях реки Гыда // Арктика и Антарктика. 2020, № 4, с. 15-31.

4. Королева Е.С., Тихонравова Я.В., ак. Мельников В.П., Слагода Е.А., Бабкина Е.А., Бутаков В.И. Формирование пятен-медальонов в полигональных торфяниках Пур-Тазовского междуречья на фоне современного потепления // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2019, № 6, С. 42-51

В других изданиях:

5. Королева Е.С., Слагода Е.А., Опокина О.Л. Переходный и промежуточный слои в торфяниках Пур-Тазовского междуречья Западной Сибири // Материалы VI всероссийского научного молодежного геокриологического форума с международным участием «Актуальные проблемы и перспективы развития геокриологии». Якутск: 2021. С. 35-37.

6. Королева Е. С., Слагода Е. А., Тихонравова Я. В. Органические пятна-медальоны в торфяниках Арктики: факторы и механизмы их формирования, экологические последствия // Материалы XXIX Всероссийской молодежной конференции. Иркутск: 2021. С. 136–138.

7. 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., Садуртдинов М.Р., Судакова М.С., Королёва 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. 53-64.

8. Koroleva E. S., Slagoda E. A., Tikhonravova Ya. V. Frost boils of the Pur-Taz interfluve // International conference “Solving the puzzles from Cryosphere”. Pushchino, Russia: 2019. С. 54-55.

9. Королева Е.С., Слагода Е.А., Тихонравова Я.В. Экологические последствия развития криогенных процессов в зоне линейных сооружений в районе Пур-Тазовского междуречья // Материалы национальной научно-практической конференции "Нефть и газ: технологии и инновации". Тюмень: 2019. Т.2, С.159-160.