

ИНСТИТУТ КРИОСФЕРЫ ЗЕМЛИ  
– обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского  
центра Тюменского научного центра Сибирского отделения  
Российской академии наук  
(ИКЗ ТюмНЦ СО РАН)

*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

диссертация на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:  
доктор геолого-минералогических наук  
Слагода Елена Адольфовна

Иркутск 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ПОНЯТИЙ .....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	6
ГЛАВА 1. МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫЕ ТОРФЯНИКИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ .....	11
1.1. Геолого-геоморфологическая приуроченность, мощность и типизация торфяников .....	11
1.2. История исследований торфяников .....	16
1.3. Переходный и промежуточные слои верхней части многолетнемерзлых пород .....	22
1.4. Минеральные и органические пятна-медальоны в полигональных системах .....	24
ГЛАВА 2. ПЕРЕХОДНЫЙ И ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ СЛОИ В ТОРФЯНИКАХ ПУР-ТАЗОВСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ И ИХ РЕАКЦИЯ НА ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЙ.....	29
2.1. Геокриологические условия Пур-Тазовского междуречья .....	29
2.2. Методы изучения торфяников .....	32
2.3. Криолитологическое строение торфяников ключевых участков Пур-Тазовского междуречья Западной Сибири .....	35
2.4. Типы льдов в полигональных торфяниках .....	70
2.5. Признаки и образование переходного и промежуточных слоев в полигональных торфяниках Пур-Тазовского междуречья Западной Сибири под воздействием изменения природных условий.....	77
ГЛАВА 3. ОРГАНИЧЕСКИЕ ПЯТНА-МЕДАЛЬОНЫ – ЭЛЕМЕНТ СТРОЕНИЯ ПОЛИГОНАЛЬНЫХ ТОРФЯНИКОВ ПУР-ТАЗОВСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ.....	87
3.1. Морфология и распространение органических пятен-медальонов .....	87
3.2. Строение и свойства органических пятен-медальонов в разрезах .....	92
3.3. Феноменологическая модель образования органических пятен-медальонов .....	106
3.4. Влияние органических пятен-медальонов на рельеф полигональных торфяников и экологические последствия .....	113
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	116
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	118
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	129

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ПОНЯТИЙ

### Единицы измерения:

см – сантиметры;

м – метры;

км – километры;

г/см<sup>3</sup> - это единица измерения плотности в системе единиц СИ

BP – радиоуглеродный возраст;

cal BP, AD – калиброванный возраст

ppm - единица измерения концентрации и других относительных величин, равная  $1 \cdot 10^{-6}$  от базового показателя

### Термины:

**Многолетнемерзлые породы (ММП)** – породы, которые имеют отрицательную или нулевую температуру, содержат в своем составе лед и находящиеся в мерзлом состоянии постоянно в течение трех и более лет [Достовалов, Кудрявцев, 1967; ГОСТ 25100-2011].

**Эпикриогенные горные породы** – породы, которые перешли в многолетнемерзлое состояние после того, как завершился процесс накопления осадков и их диагенетического преобразования [Общая геокриология, 2002].

**Синкриогенные горные породы** – породы, которые формируются из осадочных отложений на уже существующем мерзлом субстрате, когда геологически синхронно происходят накопление осадка и его переход в мерзлое состояние [Общая геокриология, 2002].

**Сезонноталый слой (СТС)** – слой, который формируется в результате оттаивания верхних горизонтов мерзлого массива горных пород в результате положительных теплооборотов в теплый период года. Обязательно наличие подстилающих мерзлых пород и слияние с многолетнемерзлой толщей в зимний период [Мерзлотоведение, 1981]

**Полигонально (повторно) - жильный лед (ПЖЛ)** - образован в значительной степени за счет многократно повторяющегося льдообразования в вертикальных морозобойных трещинах, периодически возникающих в одном и том же месте, в плане образуют четкую полигональную решетку и в разрезе имеют форму клина или жилы [Общая геокриология, 2002]

**Термокарстово-полостной лед** - льды, формирующиеся при замерзании свободной воды в небольших полостях [Тихонравова, 2019].

**Сегрегационный лед** – лед, формирующийся в породах при миграции слабосвязанной воды к фронту промерзания [Шумский, 1955].

**Полигональный торфяник** – торфяник, характеризующийся наиболее низкой степенью выраженности элементов микрорельефа по вертикали и четким полигональным рисунком в плане [Кашперюк, 1985].

**Переходный слой** – зона максимального оттаивания в наиболее теплые периоды. В эти годы он является нижней частью СТС, при этом в неблагоприятные годы должен не менее трех лет находиться в мерзлом состоянии; выполняет защитную роль для ММП [Шур, 1988].

**Промежуточный слой** относится 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 [Шур, 1988].

**Минеральные пятна-медальоны** - мелкополигональные формы рельефа, которые образуются в результате мелкополигонального растрескивания при неравномерном промерзании сверху и с боков, закрытых (замкнутых) объемов талого грунта в слое сезонного оттаивания [Общая геокриология, 2002].

**Хасырей** – осушенная озерная котловина в Западной Сибири, которая имеет термокарстовое происхождение, часто заболочена. [Геокриологический словарь, 2003].

**Синкриогенный торф** – торф, накопившийся на фоне циклического сезонного и короткопериодного промерзания-протаивания синхронно в

геологическом времени, перешедший в многолетнемерзлое состояние без диагенетического преобразования.

**Органические пятна-медальоны** – скопления тонкодисперсной органической массы без растительности, округлые и вытянутой формы; выполняют понижения микрорельефа и обрамлены кочками на поверхности торфяников. Формируются в пределах сезонноталого слоя над локальными понижениями кровли многолетнемерзлых пород в теплый сезон года.

## 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.

**Объектом исследования** являются полигональные торфяники Пур-Тазовского междуречья.

**Предмет исследования:** криогенное строение полигональных торфяников, свойства торфа, переходный и промежуточные слои, органические пятна-медальоны, синкриогенный торф, подземные льды.

**Научная задача** заключается в изучении закономерностей формирования полигональных торфяников в связи с колебаниями климата.

**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.

**Гипотеза:** в строении торфяника присутствуют переходный и промежуточные слои, обладающие определенными признаками. При современных тенденциях изменения климата будет происходить: углубление сезонноталого слоя за счет вытаивания переходного и промежуточного слоев, формирование органических пятен-медальонов и изменение микрорельефа торфяников.

**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 разных лет без участия промерзания.

**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.

**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 хасыреях 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 поддержку всех идей.

## **ГЛАВА 1. МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫЕ ТОРФЯНИКИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

Север Западной Сибири отличается сложными инженерно-геологическими и геокриологическими условиями верхней части ММП, в т.ч. широким распространением многолетнемерзлых льдистых и талых торфяных массивов, залегающих с поверхности. Общая заболоченность Западной Сибири составляет выше 30% территории [Лисс и др., 2001] и до настоящего времени происходят процессы заболачивания и торфонакопления [Инишева, Сергеева, Смирнов, 2012; Инишева, Березина, 2013].

### **1.1. Геолого-геоморфологическая приуроченность, мощность и типизация торфяников**

Торфяные массивы местами занимают до 80% площади отдельных геоморфологических элементов поверхности. В многолетнемерзлом состоянии находится около 50% торфяников севера Западной Сибири, севернее широты Полярного круга талые участки практически отсутствуют [Трофимов, Бадю, Дубиков, 1980; Кашперюк, 1985], таликовые зоны в районе распространения торфяников встречаются под крупными водотоками и озерами [Геокриология СССР, 1989]. На торфяниках в южных районах Западной Сибири, таких как Васюганские болота, участки с многолетнемерзлыми торфами не превышают 10-15% [Кашперюк, 1985].

Континентальная часть Западной Сибири разделена на три зоны: Заполярную, Северную и Южную. Каждая зона характеризуется закономерным распространением многолетнемерзлых и сезонномерзлых пород. Заполярная зона — зона преимущественно сплошного распространения толщ многолетнемерзлых пород, мощность которых от 300 до 450 м и более. Температуры пород в подзонах низкотемпературных ММП составляют ниже  $-7^{\circ}\text{C}$ , в подзонах среднетемпературных ММП —  $-3...-7^{\circ}\text{C}$ . Северная зона — зона прерывистого распространения с двухслойным строением толщи многолетнемерзлых пород. Мощность мерзлых пород,

залегающих с поверхности, различна в разных районах этой зоны: от 10-50 м до 300-450 м. Температуры пород в подзонах массивно-островного развития ММП составляют  $-1 \dots -3^\circ\text{C}$ , в подзонах островного развития ММП –  $0 \dots -1^\circ\text{C}$ , в подзонах редкоостровного развития ММП температура близка к  $0^\circ\text{C}$ . Южная зона — характеризуется развитием сезонномерзлых пород, ее северная граница проходит по южной части островной мерзлоты, которая залегает с поверхности и существует в естественных условиях. Температуры пород в северной части зоны составляют  $1-3^\circ\text{C}$  [Шполянская, 1971; Гиличинский, 1986; Трофимов и др., 1987; Геокриология СССР, 1989] (рис.1).

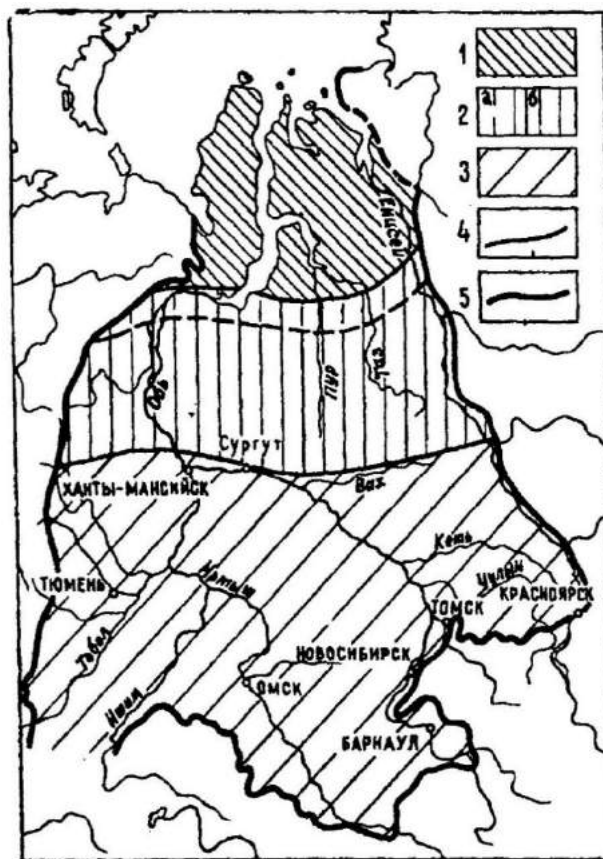


Рис. 1. Мерзлотные зоны Западно-Сибирской плиты по А.В. Груздову, В.Т. Трофимову [1980]. Зоны: 1 - практически сплошного распространения многолетнемерзлых пород; 2 - прерывистого по площади распространения многолетнемерзлых пород; 3 - распространения сезонномерзлых пород. Подзоны: а - развития многолетнемерзлых пород с островами талых (сезонномерзлых) пород; б - совместного широкого развития многолетне- и сезонномерзлых пород. Границы: 4 - мерзлотных зон; 5 - Западно-Сибирской плиты

В первой и второй геокриологических зонах распространены в основном полигональные торфяники. Наиболее северные бугристые торфяные массивы распространены между 66° и 67° с.ш. [Лисс и др., 2001].

В связи с современными изменениями климата в зонах южной тундры и лесотундры началось оттаивание многолетнемерзлых пород сверху. Опускание кровли ММП на 5-8 м и формирование участков несливающейся мерзлоты обнаружены в южной лесотундре [Дроздов и др., 2010]. В районе Южного Уренгоя за 1975-2018 гг. граница лесотундры продвинулась на 30-40 км [Васильев и др., 2020]. Мерзлые торфяные и торфяно-минеральные бугры пучения остаются сравнительно устойчивыми, здесь деградации мерзлоты не наблюдается [Бочкарев, 2014]. На Пур-Тазовском междуречье повышение температур ММП отмечено только на водоразделах в минеральных грунтах [Хомутов и др., 2019].

Ю.К. Васильчук [2013] уточнил положение южной границы современного распространения многолетнемерзлых пород в Западной Сибири на основе анализа расположения островов многолетнемерзлых пород, представленных миграционными буграми пучения.

П.И. Кашперюк [1985] в торфяных массивах Западной Сибири выделил пять основных типов: полигональные, бугристые, плоские, кочковатые и грядово-мочажинные. Типы торфяных массивов выделены по морфологическим особенностям: площади, внешней форме элементов микрорельефа, высоте, наличию полигонального микрорельефа, приуроченности к геоморфологическим уровням и их генезису. Г.Г. Осадчая, Н.В. Тумель [2012] на примере Европейского северо-востока определили, что торфяники являются универсальными индикаторами распространения ММП. Например, плоскобугристые торфяники не развиты в подзоне островной мерзлоты, а полигональные и плоские заозеренные торфяники характерны для подзоны сплошной мерзлоты. Болотоведы отмечают, что в развитии торфяников существенное влияние оказывает динамика растительного

покрова, которая влияет на развитие валиков полигонов, морозобойное растрескивание грунтов, накопление и консервацию ПЖЛ [Тыртиков, 1979].

Полигональные и бугристые торфяники находятся, в основном, в мерзлом состоянии, распространены в северных геокриологических зонах Западной Сибири и отмечены на всех геоморфологических уровнях Ямала, Гыдана, Тазовского полуострова и широтной полосе Обь-Тазовского междуречья [Кашперюк, 1985](рис. 2). Наибольшее развитие они имеют на

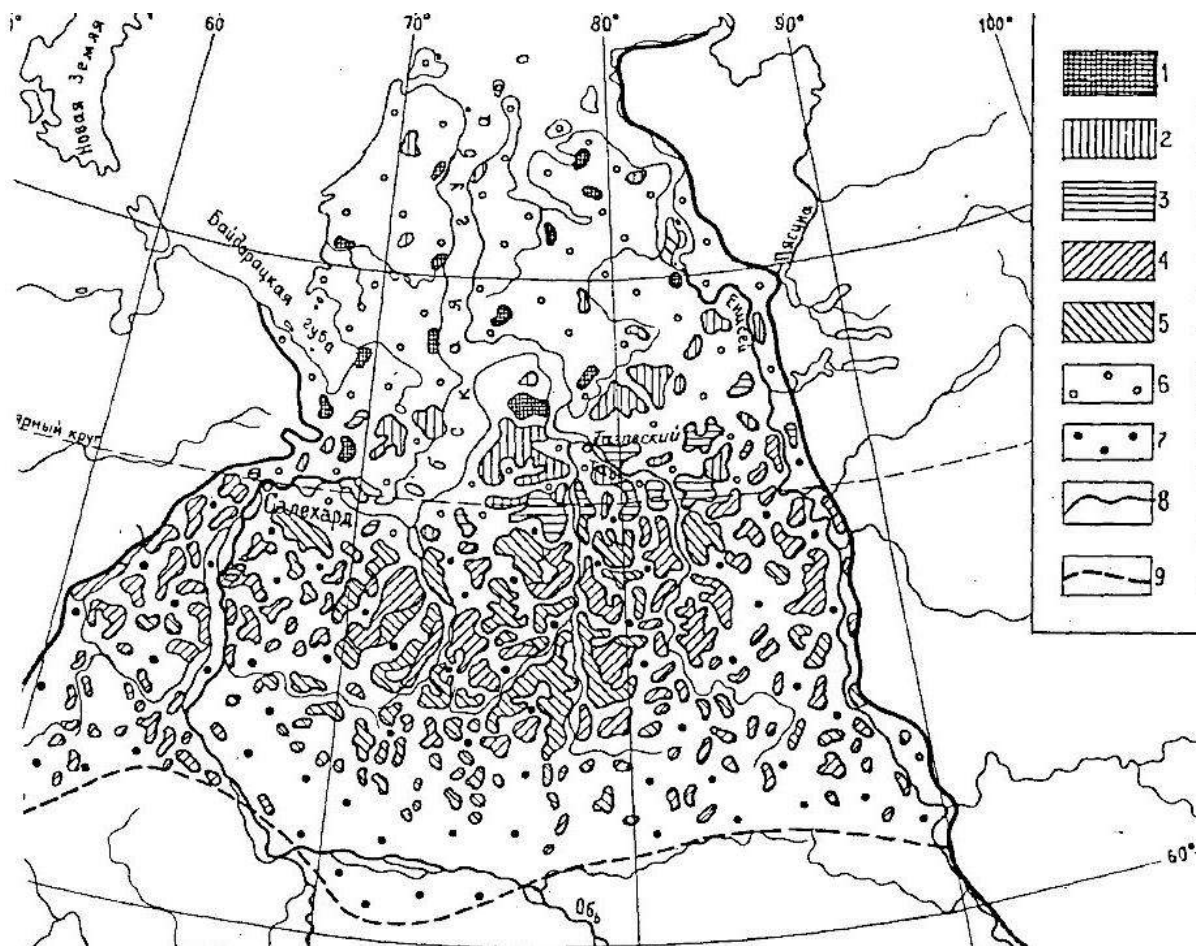


Рис. 2. Распространение и типы многолетнемерзлых торфяных массивов Западно-Сибирской плиты по П.И. Кашперюку [1985]. 1-5 - типы торфяных массивов: 1 - валиковополигональные, 2 - плоскополигональные; 3 - бугристополигональные, 4 - выпуклополигональные, 5 - пологобугристые; 6 - территория развития небольших по площади полигональных торфяных массивов; 7 - территория развития небольших по площади/на юге - отдельных торфяных бугров/бугристых торфяных массивов; 8 - границы торфяных массивов; 9 - южная граница распространения с поверхности многолетнемерзлых торфяных массивов

заболоченных плоских участках лайд, высоких пойм, первых и вторых морских, лагунно-морских и аллювиальных террасах. На более высоких геоморфологических уровнях морских и аллювиальных равнин торфяные массивы занимают долины рек, приозерные котловины и хасыреи [Лисс и др., 2001].

Полигональные торфяники (рис. 3) на севере Западной Сибири включают три вида: валиково-полигональный с мощностью торфа 0,5-5,1 м, плоско-полигональный – 0,5-3 м и бугристо-полигональный – 0,5-6,5 м [Геокриология СССР, 1989]. Строение и льдистость первых двух видов П.И. Кашперюк [1985] связывал с сингенетическим промерзанием торфа и ростом ПЖЛ. Тип промерзания бугристо-полигональных торфяников до конца не был определен, т.к. собранные данные указывали как на эпигенетическое промерзание торфяной толщи, так и на сингенетическое.



Рис. 3. Полигональный торфяник Пур-Тазовского междуречья (фото Р.Р. Хайруллина с применением БПЛА)

Выделенные разновидности довольно четко отличаются по внешней форме элементов микрорельефа, но вместе с тем они часто связаны между собой постепенными переходами, встречаясь в пределах единого торфяного массива. Такая тесная связь и частое наличие постепенного перехода одного вида в другой в пределах торфяного массива являются свидетельствами их стадийного развития [Тыртиков, 1979]. Бугристые торфяники, расположенные между 65-68° с.ш., включают два морфологических вида в зависимости от состава подстилающих пород: выпукло-бугристый (торф мощностью 0,5-1,0 м подстилается глинистыми грунтами) и пологобугристый (торф мощностью 0,5-5,5 м подстилается песками) [Геокриология СССР, 1989].

До сих пор существует неопределенность условных границ между разными типами промерзания торфяников. Полигоны с валиками формируются не только на фоне сингенетического промерзания, но и на фоне разрушения полигональных систем в торфе [Тихонравова, 2019]. Эта неопределенность вытекает из недостаточно детальной изученности свойств и криогенного строения торфяников.

## **1.2. История исследований торфяников**

Интерес к торфяникам возник с начала XVIII века и был связан с их использованием в качестве топлива [Тюрёмнов, 1976]. Основное изучение болот в Западной Сибири началось с конца первой половины XX века такими исследователями, как М.И. Нейштадт [1971; 1976]; С.В. Кац, Н.Я. Кац, Е.И. Скобеева [1977] и др. Был накоплен массив знаний о болотах, ботаническом составе, возрасте отложений и мерзлых торфяных массивах. В 1960-70-х годах в составе комплексных инженерно-геологических экспедиций Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, ВСЕГЕИ, ВСЕГИНГЕО, Тюменнефтегаз, Фундаментпроект и другими научно-исследовательскими и производственными организациями были получены данные о ММП, в том числе о мерзлых торфяниках, которые



позволили составить представление о составе и строении ММП, развитии и распространении криогенных процессов, а также провести инженерно-геологическое районирование Западной Сибири.

Болотоведами в Западной Сибири было установлено, что в зависимости от характера питания торфяника различается его растительность: на торфяниках преимущественно атмосферного питания произрастают растения олиготрофного (верхового) типа, не требующие богатого минерального питания, например, сосна, пушица, сфагновые мхи. На торфяниках грунтового и речного питания – растения евтрофного (низинного) типа, нуждающиеся для своего произрастания в большом количестве минеральных солей, например, ольха, береза, осоки, зеленые мхи [Тюремнов, 1976]. Торфяники переходного типа занимают промежуточное положение между низинными и верховыми [Пьявченко, 1955]. По составу на севере и юго-западе западной Сибири преобладают низинные типы торфа, в центральных и более южных районах – переходные и верховые [Геокриология СССР, 1989].

Интенсивность торфонакопления исследователи определяют по соотношению процессов: ежегодного прироста органического вещества и неполного разложения отмирающих частей органической массы в условиях повышенного увлажнения и недостатка кислорода [Лисс и др., 2001], без учета влияния процессов промерзания и протаивания на свойства и мощность торфа.

Первые очаги торфонакопления в Западной Сибири возникли около 10 т.л.н. [Пьявченко, 1971; Васильчук, Петрова, Серова, 1983; Васильчук и др., 2016]. В предбореальном периоде (10-9 т.л.н.) природные условия были неоднородны. Фазы холодного и влажного и холодного сухого климата чередовались с фазами теплого сухого и теплого влажного [Архипов, Волкова, 1994]. Бореальный период (9-8 т.л.н.) сопровождался морозобойным растрескиванием и ростом ПЖЛ севернее полярного круга. Мощность торфов к началу атлантического периода была 1-1,5 м.

Атлантический период (8-5 т.л.н.) характеризуется массовым болотообразованием на Севере Западной Сибири, причем наиболее интенсивно процесс болотообразования происходит с середины атлантического периода [Кашперюк, 1985; Лисс и др., 2001]. Температуры вегетационного периода были на 2-3 градуса выше современных [Васильчук и др., 2016]. Во второй половине атлантического периода происходило продвижение древесных растений в зону тундры [Лисс и др., 2001]. Резкое ухудшение климатических условий относят к атлантико-суббореальному рубежу (4,5 т.л.н.), при этом происходила деградация лесной растительности в северной части ее распространения. Во второй половине голоцена суббореальный (5-3 т.л.н.) и субатлантический периоды окончательно оформляется современный облик болотных систем [Кашперюк, 1985; Архипов, Волкова, 1994].

Свойства торфяных отложений зависят от их ботанического состава и активности их взаимодействия с водой [Романов, 1961; Лисс и др., 2001]. Торф является полезным ископаемым, поэтому его физические, химические, механические свойства и ботанический состав в талом состоянии изучались достаточно подробно [Костюк, 1967; Лиштван и др., 1989; Амарян, 1990; Штин, 2012].

В последнее время акцент в изучении торфяников в научных публикациях был сделан на изучение видового разнообразия, возраста торфяников и изменений природных условий при их формировании.

Ю.К. Васильчук и др. [2016] установил, что полигональные торфяники большой мощности на севере Западной Сибири отражают этап усиления континентальности климата и формировались с высокой скоростью (около 5 мм/год и выше), что делает возможным накопление 4–5 м торфа за 700–1000 лет. Повышенная мощность полигональных торфяников связана с одной стороны с высокой льдонасыщенностью как текстурными, так и повторно-жильными льдами и с другой - с высокой скоростью роста, накоплением торфа и быстрым переходом его в мерзлое состояние

[Васильчук и др., 2016]. Булгуняхи и миграционные бугры пучения являются голоценовыми, более древних бугров в мерзлом состоянии не зафиксировано [Васильчук и др., 2012].

Выделены два этапа активного пучения и торфонакопления. Первый этап произошел в оптимум голоцена 6-7 т.л.н. Он совпадает с активным ростом повторно-жильных льдов на севере Западной Сибири и активизацией миграционного пучения, связанного с дренированием заболоченных территорий и достаточно низкими зимними температурами [Васильчук и др., 2008]. Второй этап активизации пучения 3,5-1,5 т.л.н. связан с дренажом обводненных участков и формированием более молодых бугров пучения, рост которых продолжается до настоящего времени [Буданцева, 2003].

Криогенное строение и льдистость являются важным геокриологическим параметром, определяющим условия развития многолетнемерзлых пород и инженерно-геологические свойства грунтов севера Западной Сибири. Криогенным строением торфов полигональных торфяников Западной Сибири занимались В.А. Усов [1980]; В.Т. Трофимов [1977]; П.И. Кашперюк [1985]; Ю.К. Васильчук [2016] и другие исследователи. Для слаборазложившихся торфов характерны микрошлировые, порфирировидные, корковые и массивные криогенные текстуры. С увеличением степени разложения криогенные текстуры переходят в тонко- и толстошлировые линзовидные, слоистые и сетчатые [Геокриология СССР, 1989]. Полигональные торфяники могут включать жильные льды вертикальной мощностью более 4 м и шириной около 2 м, их формирование связано с сингенетическим промерзанием [Васильчук и др., 2016].

Сингенетическое промерзание торфяников и формирование жил происходит на фоне похолодания, при среднегодовых температурах пород не выше  $-2^{\circ}\text{C}$  [Романовский, 1977]. Формирование валикового микрорельефа всегда связывали с образованием полигонально-жильных льдов на фоне похолодания климата. Потепление климатических условий вызывает

прекращение морозобойного растрескивания, вытаивание ледяных жил, которое сопровождается, с одной стороны разрушением и перестройкой торфяного массива, а с другой - новообразованиями льдов разного типа [Тихонравова, 2019], увеличивающих льдистость приповерхностных слоев. Данных о росте валиковых форм за счет процессов пучения и новообразований льдов в торфяниках, а также изменении микрорельефа при изменении тренда в сторону потепления мало, что говорит о недостаточной изученности торфяников и их реакции на изменения климата.

В тундре Западной Сибири большую часть занимают торфяники с погребенными полигонально-жильными льдами, которые были сформированы в голоцене. Вытаивание полигонально-жильных льдов (рис. 4) и протаивание верхней части торфяников связано не только с естественными изменениями климата, но и с нарушением торфяного покрова после пожаров или колеями от вездеходов.



Рис. 4. Полигональный торфяник Пур-Газовского междуречья (черный цвет – затопленные межполигональные промоины) (фото Р.Р. Хайруллина с применением БПЛА)

В результате антропогенных нарушений жилы начинают протаивать сверху, над ними образуются ложбины, заполненные водой и просадки пород. В ложбинах увеличивается протаивание, просадки и постепенно на месте жил образуются канавы, а полигоны, сложенные торфом, приобретают выпуклую форму [Кашперюк, 1985; Тыртиков, 1979]. На перекрестках канав образуются широкие водоемы (рис. 4), а в случае застоя вод - глубокие термоэрозионные колодцы.

Верхнюю талую часть торфяных массивов севера Западной Сибири почвоведы относят к почвенному горизонту. В его формировании участвуют такие процессы как: пучение, просадки, термоэрозия, морозобойное растрескивание. Эти процессы проявляются в почвенном профиле в виде языковатости горизонтов, морозобойных трещин, заполненных сильноразложившимся торфяным материалом, сильной турбированности профиля и погребение почв после излияния грунта [Матышак, 2009; Лупачев, Губин, 2012].

Особое внимание при изучении торфяников уделялось физико-механическим свойствам и характеристикам торфяных залежей криолитозоны. Свойства мерзлых торфов изучались различными исследователями [Каган, 1971; Роман, 1987 и др.]. Л.Т. Роман [1987] отмечено, что низкая теплопроводность частиц и высокая влагоемкость торфа, по сравнению с минеральными грунтами, способствуют замедлению скорости оттаивания-промерзания. Низкая теплоемкость торфа обеспечивают большую сохранность температур ММП и определяет пучинистость в приповерхностных слоях.

Все торфяные залежи изучались в связи с инженерно-геологическими целями для оценки устойчивости фундаментов, строительства линейных сооружений и с освоением заболоченных территорий. Полученные данные впоследствии были отражены в нормативных документах и классификациях, связанных с инженерно-геологическими изысканиями, а также для

дорожного строительства [ГОСТ 25100-2011; ГОСТ 10650-2013; СП 25.13330.2012 и др.].

### **1.3. Переходный и промежуточные слои верхней части многолетнемерзлых пород**

На слой СТС и верхнюю часть ММП оказывают воздействие кратковременные сезонные, межгодовые и длительные в геологическом масштабе времени изменения климатических условий и связанные с ними геокриологические процессы. Особенно важно понимание процессов, происходящих на контакте СТС и ММП. Под воздействием климатических колебаний в нижней части сезонно-талого слоя 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. В ближайшие десятилетия переходный и промежуточный слои торфяников могут перейти в талое состояние, поэтому исследования их строения и свойств на фоне современного потепления остается актуальной палеогеографической задачей. Впервые термин переходный слой ввел В.К. Яновский [1933]: «Переходный слой – слой рассеивания глубины сезонноталого слоя».

В верхней части криолитозоны Восточной Сибири Ю.Л. Шур [1988, 2005] выделил переходную зону между ежегодно оттаивающим СТС и ММП (рис. 5), в которую были включены переходный и промежуточный слои.

Переходный слой - это зона максимального оттаивания в наиболее теплые годы. В эти годы он является нижней частью СТС, при этом ежегодно не оттаивает и не менее трех лет находится в мерзлом состоянии, 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.

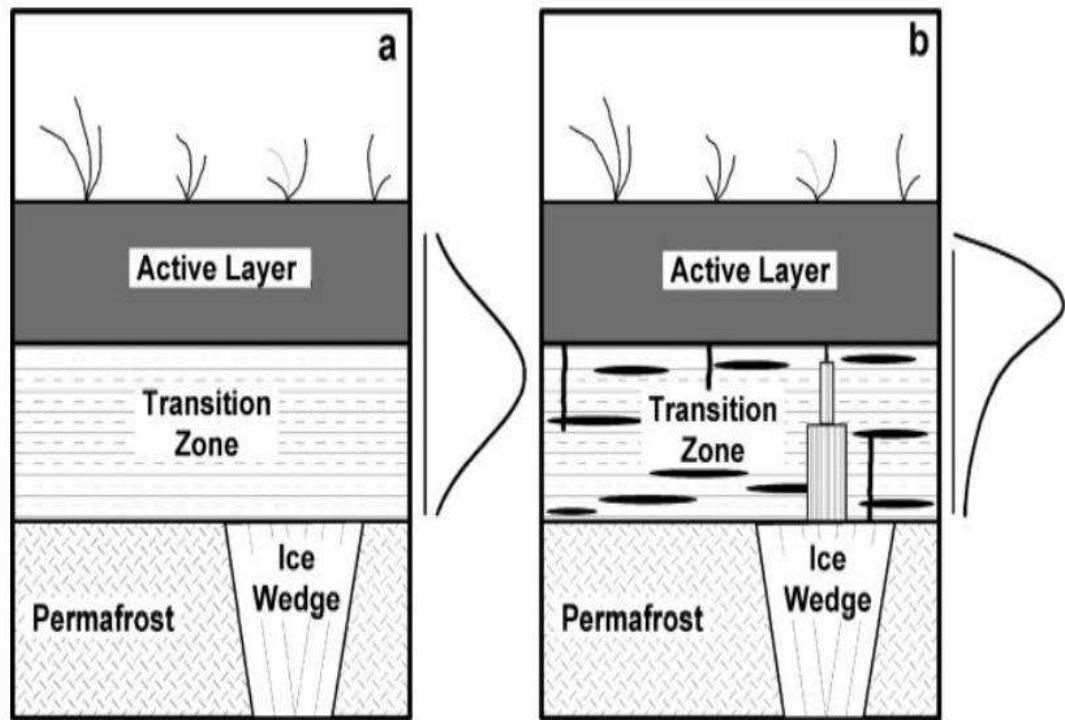


Рис. 5. Схема концептуальной трехслойной модели мерзлых пород по Y.L. Shur, K.M. Hinkel, F.E. Nelson [2005]. Относительная вероятность годовой глубины протаивания сразу после очень глубокого протаивания (a) и при обогащении льдом переходной зоны в течение нескольких веков (b)

Автором установлены следующие признаки промежуточного слоя в минеральных отложениях: 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, имеет изменение льдистости в разрезе и относительную однородность в горизонтальном направлении. В торфяниках переходный и промежуточные слои не были выявлены.

Перечисленных классификационных признаков недостаточно для выделения переходного и промежуточного слоев в торфяниках и минеральных грунтах на Европейском Севере, поэтому Каверин и др.

предложили новый термин «верхний слой многолетней мерзлоты», т.к. верхние многолетнемерзлые горизонты характеризуются постепенным изменением различных параметров, занимая промежуточное значение между СТС и ММП [Каверин и др., 2012].

А.В.Лупачев, С.В. Губин [2008] выделили переходный слой на Индигирской низменности, а также определили, что перенос, аккумуляция и захоронение материала в переходном слое являются частью биогеохимического круговорота в мерзлотных областях.

Пульсации, связанные с сезонным промерзанием и оттаиванием, могут приводить к изменению слоистости торфа [Васильчук и др., 2008], криотурбациям, но данных по изменению свойств торфа не приведено. В отличие от минеральных грунтов процессы промерзания и оттаивания в торфяных грунтах проходят более медленно, т.к. на фазовые переходы при большом влагосодержании затрачивается значительно большее количество тепла [Роман, 1987]. Торф имеет неравномерную влажность, льдистость, плотность, степень разложения, а также включения веточек и даже крупных неразложившихся древесных остатков, что определяет неравномерность процессов промерзания и оттаивания в пределах торфяного массива.

Переходный и промежуточные слои формируются на фоне перехода от потепления к похолоданию, поэтому высокая льдистость определяет их буферную роль для ММП при стабильных климатических условиях.

#### **1.4. Минеральные и органические пятна-медальоны в полигональных системах**

В зоне развития ММП широкое распространение имеют структурные грунты [Уошборн, 1988]. В тундре хорошо известны минеральные пятна-медальоны, образование которых связано с промерзанием сезонно-талого слоя и осадками при оттаивании отложений.

При промерзании СТС пучение отложений происходит без подтока влаги извне, т.е. по типу «закрытой» системы [Романовский, 1993].



Промерзание сопровождается морозобойным растрескиванием, ростом давления в закрытой системе, пучением и излиянием разжиженной грунтовой массы на поверхность [Попов, Розенбаум, Тумель, 1985]. В теплый период в протаявших пятнах-медальонах продолжается развитие криотурбаций - осадка и перемешивание грунтов за счет плавного конвективного перемещения материала [Романовский, 1993]. Латеральная и вертикальная нисходящая миграция, перераспределение грубого органического материала между элементами микрорельефа происходят как на дневной поверхности, так и по неровной кровле мерзлоты [Губин, Лупачев, 2008]. Развитие криотурбаций непосредственно связано с мощностью, льдистостью, нанорельефом и сезонной динамикой СТС.

Минеральные пятна-медальоны широко распространены на террасах и равнинах, сложенных супесями, суглинками и песками южной тундры Пур-Тазовского междуречья (рис. 6).

Минеральные пятна-медальоны относят к мелкополигональным структурным формам, развитым в деятельном слое поверхности с полигональным рельефом. Зимой в результате морозобойного растрескивания и летом в результате усыхания пород в пятнах и вокруг образуются трещины. Развитие трещин предопределяет неравномерное осеннее промерзание пород, в результате чего в центральных частях блоков образуются замкнутые системы с талым тиксотропным грунтом. При промерзании в них резко возрастает гидростатическое давление, происходит переход тиксотропных грунтов в пластично-текучее состояние, прорыв мерзлой корки и излияние их на поверхность в виде пятен [Общее мерзлотоведение, 1978; Мельников, Спесивцев, 2000].

Большинство исследователей в области мерзлотоведения и почвоведения связывают образование пятен-медальонов только с процессом промерзания в начале холодного периода. Для минеральных пятен-медальонов глинистого состава Р. Маскау [1979] предложил равновесную модель развития. Он считает, что активное развитие пятен-медальонов

сезонно-талого слоя происходит, если поверхность мерзлоты под пятном-медальоном имеет вогнутую (чашеобразную) форму, а под растительным бордюром, окаймляющим пятно, глубина оттаивания меньше, чем в его центре. Промерзание происходит сверху, сбоку со стороны окаймляющих пятно морозобойных трещин и снизу от мерзлой толщи. Образование глинистых пятен-медальонов происходит только при средних температурах пород ниже  $-2...-3^{\circ}\text{C}$  вблизи поверхности, что предопределяет зональную приуроченность активных пятен-медальонов к длительно устойчивым, устойчивым и арктическим типам сезонного оттаивания пород [Романовский, 1993].

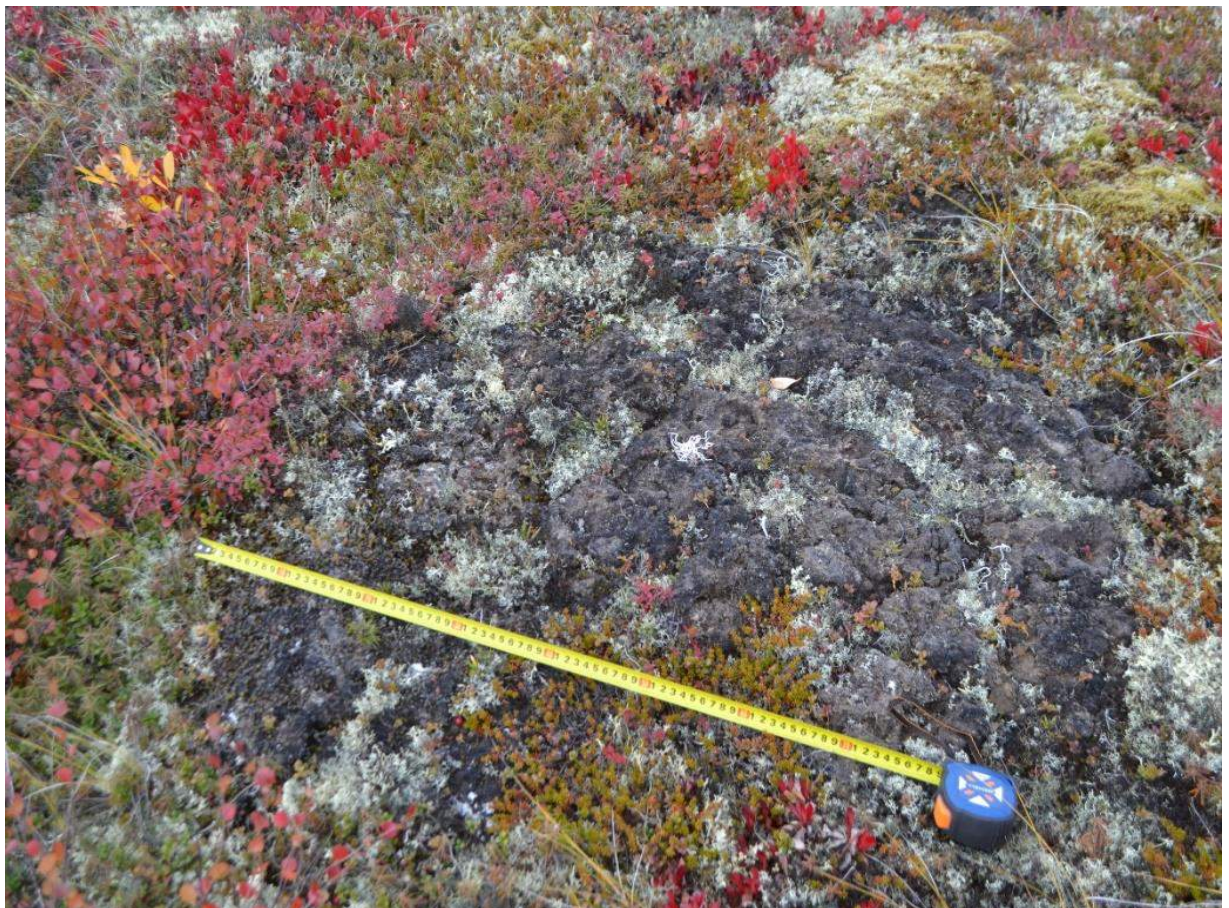


Рис. 6. Минеральное пятно-медальон в районе Пур-Тазовского междуречья

Кроме минеральных, широкое распространение в криолитозоне имеют черные органические пятна-медальоны, приуроченные, в основном, к мощным полигональным торфяникам. Подобные бурые пятна органического материала выявлены в торфяниках северной тайги [Огнева и др., 2016] и в

торфяниках Европейского севера [Каверин, Пастухов, 2013; Каверин и др., 2016]. Механизм образования таких пятен-медальонов в почвенном покрове в бугристых и плоскополигональных торфяниках не имеет однозначного объяснения. В.Д. Василевская и др. [1986] связывают образование органических пятен без растительного покрова с деградацией почв торфяников в суровых гидротермических условиях и с дефицитом биофильных элементов. М. Seppälä [2003] связывает появление таких пятен в торфяниках с механическими экзогенными воздействиями “ледовыдуванием” - совместным влиянием сильного ветра и твердых кристаллов льда и снега, которые разрушают растительный покров. О.А. Огнева, Г.В. Матышак и др. [2016] указывают на преобладающий процесс криогенного пучения при образовании торфяных пятен, мешающих поселению растительности, а также криотурбирование на фоне промерзания СТС. Признаков инъекций под торфяными пятнами в северной тайге установлено не было. Д.А. Каверин и др. [2013] объясняют формирование и существование оголенных торфяных пятен на плоскобугристых торфяниках криогенным вспучиванием, растрескиванием и поверхностно-эрозионными процессами, снеговой коррозией и ветровой дефляцией. Большинство авторов связывает образование пятен-медальонов в торфяниках исключительно с зимним промерзанием СТС.

Органические пятна-медальоны могут относиться к мелкополигональным структурным формам, развитым в деятельном слое полигональных торфяников, по аналогии с минеральными пятнами-медальонами.

Отсутствие обоснованного объяснения образования таких органических пятен-медальонов делает актуальным изучение их связи с процессами неравномерной осадки поверхности, уплотнения и пучения залежи, с элементами строения торфяных массивов - криотурбациями, с ледяными жилами и псевдоморфозами, криогенными текстурами и просадками, переходным и промежуточными слоями. Сведений об

особенностях строения торфа, развитием криогенных процессов в полигональных торфяниках и их связи с изменениями климата недостаточно.

**Выводы по главе 1:** признаки и свойства промежуточного и переходного слоев в торфяных массивах не установлены; причины и механизмы образования органических пятен-медальонов не определены.

## **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**

Пур-Тазовское междуречье расположено в северо-восточном секторе Западной Сибири, разделяет Тазовский и Гыданский полуострова, в низовьях р. Таза и его крупных левых притоков. В его рельефе выделяют следующие геоморфологические элементы – лайды, поймы, террасы и равнины, с озерными котловинами, речными долинами и хасыряями [Карта «Природных комплексов севера Западной Сибири», 1991]. Абсолютные отметки наиболее высоких участков поверхности III озерно-аллювиальной равнины достигают 63 м. Верхняя часть мерзлых толщ сложена четвертичными аллювиальными, озерными, озерно-болотными и морскими отложениями [Баду, 2011]. ММП севернее полярного круга развиты с поверхности и имеют практически сплошное распространение за исключением таликов под крупными водотоками и озерами. Мерзлая толща имеет двухслойное строение. В п. Тазовский в скважине по электрокаротажу установлено, что первый слой залегает в интервале 0-250 м, второй – в интервале 340-395 м. Температуры ММП в торфяных массивах составляют  $-3 - -5^{\circ}\text{C}$  [Геокриология СССР, 1989].

В многолетнемерзлых породах региона распространены как однородные эпикриогенные, так и генетически неоднородные по типу промерзания толщи, сложенные сверху синкриогенными отложениями мощностью 4-5 м, ниже - эпикриогенными. Для них характерна высокая суммарная льдистость (80-90%) за счет крупносетчатых и базальных криогенных текстур [Геокриология СССР, 1989; Региональная криолитология, 1989].

Район исследований расположен в пределах южной тундры и лесотундры Пур-Тазовского междуречья, в районе с. Газ-Сале и п.

Тазовский. Глубина СТС для торфяников в 60-80-е годы прошлого века в среднем составляла 0,4 м [Геокриология СССР, 1989].

Полигональные торфяники в районе исследований распространены преимущественно в хасыреях, термокарстово-эрозионных ложбинах с остаточными озерами, на поймах старичных озер, малых рек и ручьев. К торфяникам Пур-Тазовского междуречья приурочены полигонально-жильные льды с вертикальным размером более 4 м [Васильчук и др., 2016]. Эти ПЖЛ отличаются гетерогенным строением, которое связано с локальными термокарстом в ходе сингенетического промерзания озерно-болотных отложений преимущественно в голоцене [Тихонравова, 2019]. В настоящее время в торфяниках проявляются активные процессы термокарста и термоэрозии по полигонально-жильным льдам, криогенное пучение и осадки, что приводит к изменению их строения и свойств торфа.

В пределах III озерно-аллювиальной равнины изучены полигональные торфяники хасыреев, расположенные в районе п. Тазовский и с. Газ-Сале (рис. 7). Среднегодовая температура воздуха в районе п. Тазовский и с. Газ-Сале за период с 2005 по 2020 гг. составляла  $-6,3^{\circ}\text{C}$  [Архив погоды в Тазовском..., 2021], что на  $2,2^{\circ}\text{C}$  выше относительно опубликованных до 1989 г данных [Геокриология СССР, 1989]. Максимальные среднелетние температуры за период 2005 по 2020 гг. отмечены в 2016 г и составляли  $12,2^{\circ}\text{C}$  [Архив погоды в Тазовском..., 2021]. Среднегодовое количество осадков около 400 мм, из них большая часть (от 250 до 300 мм) обычно выпадает в апреле – октябре [Геокриология СССР, 1989]. В 2016 г годовая сумма осадков составила 433 мм, за период апрель – сентябрь ниже нормы – 218 мм [База данных гидрометеорологических наблюдений суточного разрешения, 2021], причем минимум осадков пришелся на июль.

В 2017-2020 гг. среднелетние температуры составляли  $9,7^{\circ}\text{C}$ ,  $9,9^{\circ}\text{C}$ ,  $9,8^{\circ}\text{C}$  и  $10,9^{\circ}\text{C}$  соответственно, что на  $0,4-1,6^{\circ}\text{C}$  выше, чем в 1969-89 гг –  $9,3^{\circ}\text{C}$  [Геокриология СССР, 1989]. Количество осадков близко к норме за апрель – сентябрь 2017 года – 274 мм, в 2018 г – 241 мм, в 2019 – 234 мм; в

2020 г осадки выше нормы и составили – 272 мм [База данных гидрометеорологических наблюдений суточного разрешения, 2021].



Рис. 7. Расположение района исследования

В 2016 г на площадках мониторинга Пур-Тазовского междуречья, расположенных в хасырях с полигональными торфяниками, наблюдалось углубление СТС (от 0,53 до 0,56 м) на всех элементах рельефа, обусловленное аномально теплым и сухим летним сезоном. 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, в межполигональных понижениях – 0,51 м, за счет просадок торфа и частичного вытаивания льдов [Королева и др., 2021] (рис. 8).

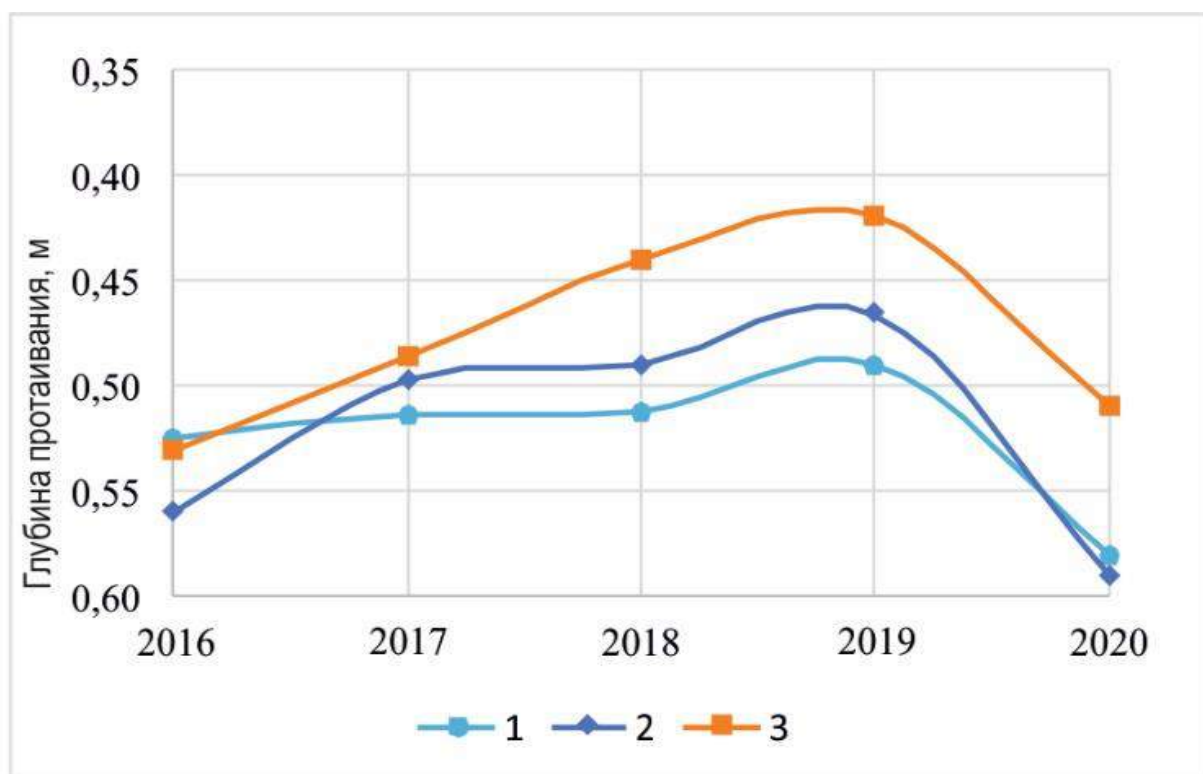


Рис. 8. Межгодовая динамика глубины протаивания на различных поверхностях: 1 - центральная поверхность полигонов, 2 - периферийная часть полигонов, 3 - межполигональные понижения

Основное внимание в исследованиях торфяных массивов в этом регионе было уделено определению возраста и ботаническому составу торфа [Kuznetsova et al., 2019; Peteet et al., 2008]. Менее детально остаются изученными свойства и строение торфа Пур-Тазовского междуречья, такие как распределение льда в торфе, криогенные текстуры и соотношение с гетерогенными залежами подземного льда.

## 2.2. Методы изучения торфяников

Основой системного подхода к изучению торфяных залежей как единого целого является выделение элементов строения и определение их свойств для диагностики механизмов и условий формирования. При этом применялись различные полевые и аналитические методы исследования торфов.

Задачами полевых работ в 2017-21 гг было изучение строения, определение возраста, установление причин и факторов, способствующих



образованию и развитию торфяных массивов; изучение структурно-текстурных особенностей строения льдов, а также физических и механических свойств торфа.

Для решения поставленных задач в полевых условиях был выполнен следующий комплекс работ: выбор 4 ключевых участков исследования при анализе аэрофотоснимков и маршрутных исследованиях, описание положения и микрорельефа выбранных участков исследований, документирование разрезов, кернов скважин; сбор гербария; отбор ориентированных монолитов льда и торфа, сохранение образцов в ненарушенном состоянии и транспортировка их в лаборатории.

В сентябре 2019 года были отобраны монолиты торфа из СТС в полигонах торфяника при помощи пробоотборника с открывающейся крышкой для удобного извлечения образцов (рис. 9 А, Б). Образцы отбирались и парафинировались по [ГОСТ 12071-2014].



Рис. 9. Пробоотборник. А - общий вид, Б - полученный монолит торфа.

На монолитах торфа (6 шт.) длиной 30-35 см, со слоями разной степени разложения и плотности, были проведены испытания на сдвиг по методике неконсолидированного быстрого среза [ГОСТ 12248-2010] в испытательной лаборатории ООО «ИнжГео». Испытания торфа методом одноплоскостного среза проведены для определения следующих характеристик прочности: угла

внутреннего трения и удельного сцепления. Эти характеристики определяют по результатам испытаний образцов грунта в одноплоскостных срезных приборах с фиксированной плоскостью среза путем сдвига одной части образца относительно другой его части горизонтальной нагрузкой при предварительном нагружении образца нагрузкой, нормальной к плоскости среза [ГОСТ 12248-2010]. Нагрузки подобраны с учетом деформации образца.

Геокриологическими методами изучены строение торфяников в 15 разрезах, криогенное строение и свойства талого и мерзлого торфа: влажность в 206 образцах определялась методом высушивания до постоянной массы, плотность в 209 образцах методами режущего кольца для талого торфа и взвешивания в нейтральной жидкости для мерзлого торфа [ГОСТ 5180-2015].

Исследования структурно-текстурных характеристик для 4 типов льдов проведено петрографическим методом [Савельев, 1963; Шумский, 1955] в поляризационном свете. Из подземных льдов отобраны ориентированные по отношению к поверхности и к стенкам монолиты 4 морфологических разновидностей льда (полигонально-жильного, термокарстово-полостного, сегрегационного и инфильтрационно-сегрегационного). Из монолитов были изготовлены прозрачные пластины и шлифы толщиной 0,5-1 мм, в трех срезах: вертикальные фронтальный «А», поперечный «В», горизонтальный «С», установлены текстурные и структурные особенности и генезис льдов [Tikhonravova et al., 2021].

Видовой состав растительных остатков в 52 образцах торфа определен в ИКЗ ТюмНЦ СО РАН А.О. Кузнецовой микроскопическим методом [Андреева, Калинкина, 2008] на основе атласов-определителей [Домбровская, Коренева, Тюремнов, 1959; Игнатов, Игнатова, 2003; Игнатов, Игнатова, 2004; Кац, Кац, Скобеева, 1977] и собственной коллекции микропрепаратов современных растений, собранной в разных подзонах тундры и лесотундры Западной Сибири. Г.В. Симоновой в ТомЦКП СО РАН выполнено

радиоуглеродное датирование 35 проб жидкостно-сцинтилляционным методом на спектрометре-радиометре Quantulus.

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

В северной части Пур-Тазовского междуречья изучено 4 хасырея с полигональными торфяниками, абсолютными отметками поверхности 6-9 м (рис. 10).

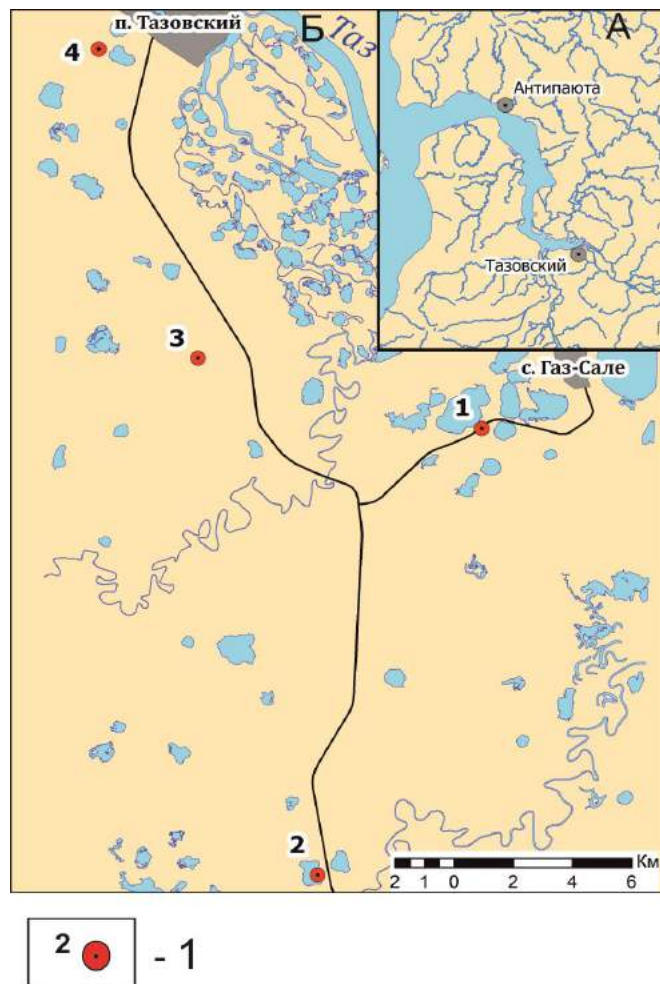


Рис. 10. Район исследования (А), ключевые участки исследований торфяников в хасыреях Пур-Тазовского междуречья (Б). Условные обозначения: 1 - ключевые участки исследования

Хасыреи ограничены увалами с остаточным полигональным рельефом и высотой бортов 3-4 м. В пределах хасыреев выделены зоны с четким полигональным рельефом и плоские, заболоченные ложбины стока,

приуроченные к перегибам поверхности террасы и плоских днищ, к насыпям дорог с водопропускными трубами.

**Ключевой участок 1.** Торфяник, пересеченный дорожной насыпью, характеризуется активным термоэрозионным разрушением полигональной системы [Бабкин и др., 2018].

**Ключевой участок 2.** Торфяник, ограниченный автомобильной дорогой и озером, характеризуется участками плоскобугристого полигонального рельефа, которые разделены ложбинами стока; на полигонах преобладает кочковатый микрорельеф с полигональными ваннами и валиками по периферии, местами полигоны полностью заросли кустарником.

**Ключевой участок 3.** Торфяник расположен на удалении от дорог, отличается интенсивными просадками поверхности над протаивающими ледяными жилами.

**Ключевой участок 4.** Торфяник расположен в бессточном хасырее. Полигоны торфяника окружены глубокими промоинами с застойной водой над вытаивающими ледяными жилами за счет подтопления.

Ключевой участок 3 является фоновыми для проведения мониторинга, т.к. не имеет техногенных нарушений и расположен вне зоны влияния дорог и инженерных сооружений.

Повсеместно на торфяниках всех участков распространены полигоны прямоугольной и трапециевидной формы, на ключевом участке 1 средний размер полигонов в 2005 г составлял: 19,6x11,8 м, а в 2020 г – 18,6x11,0 м. Полигоны на ключевых участках 1 и 4 разделены глубокими промоинами, возникшими за счет термоэрозии и термокарста по вытаивающим ПЖЛ. Трапециевидная форма полигонов, дугообразная и радиальная ориентировка магистральных межполигональных понижений подчеркивают промерзание хасырея от бортов к центру. Промоины и понижения над жилами, обрамляющие полигоны, имеют, в основном, трехлучевое сочленение. Ширина межполигональных понижений над разными жилами составляет 0,7-3,8 м, превышение полигонов над понижениями 0,1-0,6 м.

Поверхность полигонов плоская осложнена кочками, полигональными ваннами, валиками вдоль межполигональных понижений и черными органическими пятнами-медальонами. Валики имеют плавный волнистый микрорельеф, образованный бугорками с кустарником и понижениями с мхом [Kuznetsova et al., 2019]. Между мелкими бугорками на валиках и в понижениях между кочками на выпуклых и плоских полигонах распространены органические пятна-медальоны. На краях полигонов они стекают в межполигональные понижения. Мелковолнистый рельеф кровли мерзлых пород повторяет микрорельеф поверхности.

### Ключевой участок № 1.

На ключевом участке 1 в 2016-20 гг изучен полный разрез торфа В7-16 в перемычке между озерами и разрезы в расчистках В8, вскрывающих верхнюю 2-х метровую часть торфяников с ПЖЛ (рис. 11). Полная мощность массива торфа разреза В8 - более 4 м вскрыта в скважине в 2020 г, нумерация слоев приведена снизу вверх от отметки 2,4 м.



Рис 11. Расположение разрезов торфяников В7 и В8 в хасырях Пур-Газовского междуречья в районе с. Газ-Сале (Космоснимок спутниковой системы WorldView-3, 18.07. 2017 года)

**В разрезе В7-16** (N 67°22'09.3" E 078°43'13.0"), расположенном в центре полигона на перемычке между двумя озерами (рис. 11) (абс. отм. 5,5 м) были вскрыты полигональный торфяник с повторно-жильными льдами и подстилающие отложения снизу вверх (рис. 12):

Слой 1 [4,0-2,4 м] – алевритовые пески мелкозернистые среднесортированные, с перемятой слоистостью серых, коричневато-серых гнезд и прослоев с зеленовато-желтыми и сизыми пятнами соединений железа. Пески содержат многочисленные включения коричневых разложившихся нитевидных корешков трав *in situ*. Криогенная текстура песков с глубины 2,8 м тонколинзовидная (влажность 25%), выше – массивная (влажность 21%). Граница с вышележащим слоем неровная. Вскрытая мощность 1,6 м

Слой 2 [2,4-1,4 м] – алевро-пески [Методы изучения осадочных пород, 1957] серо-коричневатые среднесортированные. Криогенная текстура неполносетчатая с влажностью 65% и крупносетчатая (влажность 93%), линзы льда толщиной от 0,3 до 4 см.

Слой 3 [1,4-0,9 м] – алевритовые пески светло-серые с сизо-серыми пятнами соединений железа, среднесортированные, с линзовидными волнистыми прослоями коричневого растительного детрита, стволиками деревьев и нитевидными корешками растений *in situ*. Криогенная текстура тонколинзовидная (влажность 39%), корковая вокруг древесных остатков. Включения льда дробят древесину по кольцам роста (рис. 13). Граница с вышележащим слоем волнистая [Slagoda et al., 2019].

Слой 4 [0,9-0,55 м] – торф черный автохтонный плохо разложившийся слоистый: на глубине 0,88-0,77 м содержит веточки, стволики деревьев, на глубине 0,55 м – слой бересты; 0,47-0,45 м – прослой черных растительных остатков. Криогенная текстура торфа толсто- и тонкослоистая линзовидная волнистая (влажность 757%), вокруг веточек – корковая, гнездовая. Глубина сезонного оттаивания торфа 0,57 м, измерена 17.08.2017.

Слой 5 [0,55-0,35м] – торф желтоватый, коричневый автохтонный из остатков мхов и трав, рыхлый, талый.

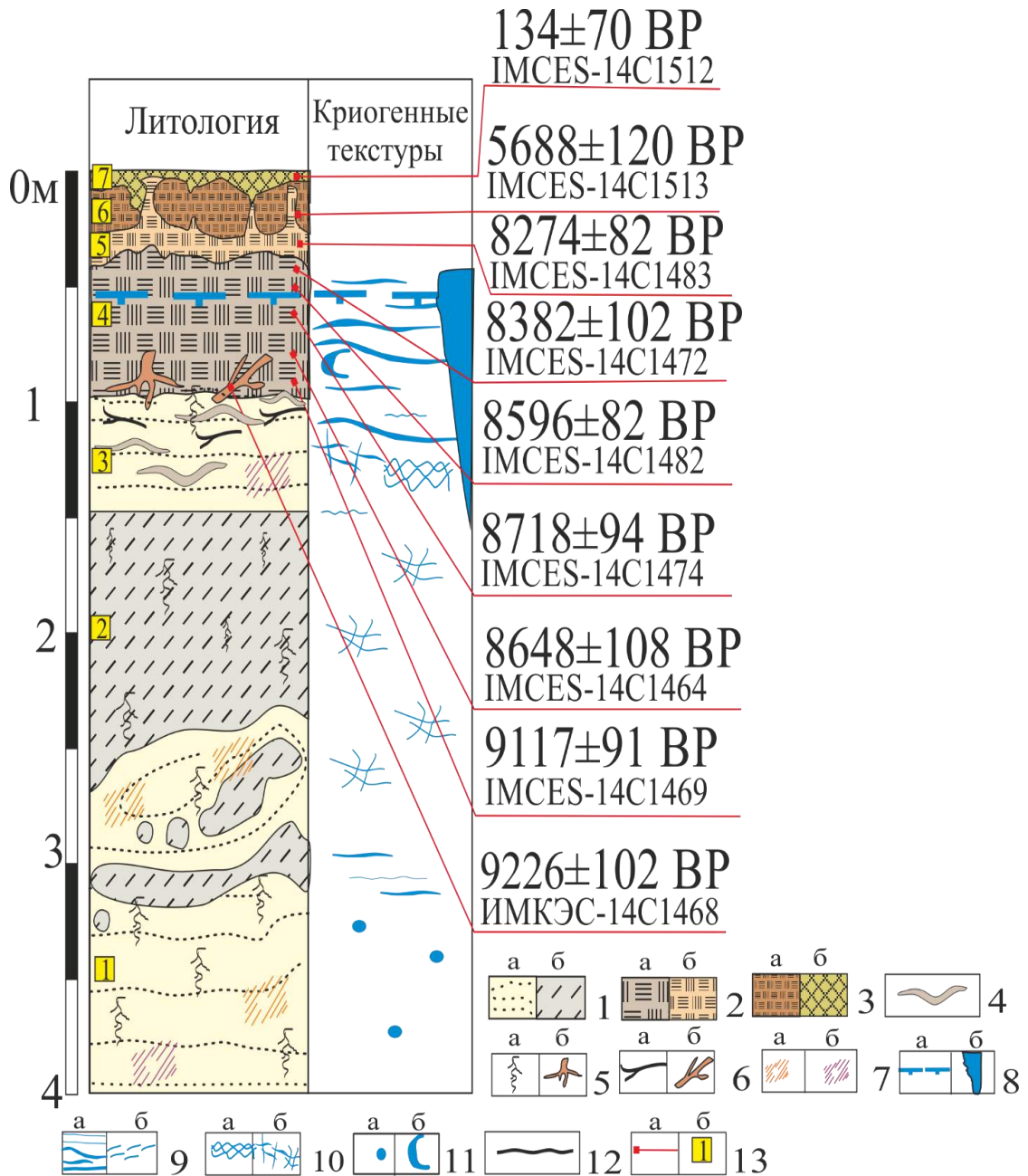


Рис. 12. Криолитологическое строение В7-16. Условные обозначения: 1 - алевритовые пески серые слоистые (а), алевро - пески серые (б); 2, 3 - слои торфа (см. описание в тексте); 4 - торф намытый синхронно произраставший; 5 - корни трав *in situ* (а), деревьев (б); 6 - детрит намытый (а), ветки, корни кустарников (б); 7 - пятна, потеки охристые (а), сизые (б); Криогенное строение: 8 - кровля многолетнемерзлых отложений (а), ледяные жилы (б); Криотекстуры: 9 - линзовидная, шпировая (а), микролинзовидная, плейчатая (б); 10 - ячеистая сетчатая (а), неполно-решетчатая (б); 11 - массивная (а), корковая (б); 12 - границы литологические и размыва; 13 - точки отбора проб на С14 (а), номер слоя (б)

Слой 6 [0,35-0,07 м] – торф темно-коричневый плотный из мелких разложенных растительных остатков, разбит на блоки размером ~ 15x30 см внедрениями грибовидной формы снизу из торфа слоя 5 и просадками свежих мхов и трав из слоя 7, т.е. криотурбированный (рис. 12); талый.

Слой 7 [0,07-0 м] – мохово-растительный слой с корнями современных мхов, трав, кустарничков, с мелкими (10 см) просадками в нижележащий торф.

Радиоуглеродный возраст торфа позволяет отнести его к первой половине голоцена (рис. 12; табл.1).

Таблица 1. Радиоуглеродный возраст в разрезе В7-16

№ слоя	Лабораторный номер	Глубина, м	Радиоуглеродный возраст (BP)	Калиброванный возраст (cal BP)
7	ИМКЭС-14С1512	0-0,07	134±70	124-150
6	ИМКЭС-14С1513	0,07-0,23	5688±120	6392-6572
5	ИМКЭС-14С1483	0,23-0,4	8247±82	9122-9310
4	ИМКЭС-14С1472	0,4-0,45	8382±102	9282-9493
4	ИМКЭС-14С1482	0,45-0,47	8596±82	9523-9668
4	ИМКЭС-14С1474	0,47-0,55	8718±94	9547-9785
4	ИМКЭС-14С1464	0,55-0,72	8648±108	9529-9773
4	ИМКЭС-14С1469	0,72-0,89	9117±91	10200-10405
4	ИМКЭС-14С1468	0,72-0,88	9226±102	10257-10445

В разрезе В7 послойно отобраны пробы торфа (табл. 2). А.О. Кузнецовой [Kuznetsova et al., 2019] и определен ботанический состав торфа. На глубине 0,72 – 0,9 м преобладают остатки осок и листья мхов с малым количеством листьев гипновых мхов, остатки березки и хвоща. Вид торфа - осоково-сфагновый. На глубине 0,55-0,72 м преобладают остатки осок, встречаются остатки кустарничков, вид торфа - осоковый. Торф слоя 4 характеризуется высокой степенью разложения и наибольшей зольностью (табл.2).



Таблица 2. Вид торфа, зольность и степень разложения торфа разреза В7-16  
[Kuznetsova et al., 2019]

№ слоя	Глубина, м	Вид торфа	Степень разложения, %	Зольность, %
7	0-0,07	Гипново-сфагновый тип	21	7,8
6	0,07-0,23	Сфагновый торф	45	7,2
5	0,23-0,4	Сфагновый торф	17	3,7
5	0,4-0,45	Осоково-сфагновый торф	52	4,3
5	0,45-0,47	Сфагновый торф	24	4,7
5	0,47-0,55	Сфагновый торф	12	6,4
4	0,55-0,72	Осоковый торф	33	8,9
4	0,72-0,9	Осоково-сфагновый торф	43	8,3



Рис. 13. Корковая криогенная текстура вокруг древесных остатков (фото Слагоды Е.А.)

На глубине 0,45-0,55 м преобладают сфагновые мхи с немногочисленными листиками гипновых мхов. В нижней части сфагновый торф обладает самой малой степенью разложения. На глубине 0,4-0,45 м в осоково-сфагновом торфе встречаются остатки березки, торф отличается

наибольшей степенью разложения (52%). На глубине 0,23-0,4 м преобладают сфагновые мхи с малой степенью разложения и наименьшей зольностью (3,7%). Слой 5 представлен сфагновым видом торфа с низкой зольностью и резкими колебаниями степени разложения растительных остатков. Слой 6 на глубине 0,07-0,23 м характеризуется преобладанием сфагнового торфа и немногочисленными остатками травянистых растений и кустарничков, высокой степенью разложения (45%) и высокой зольностью (7,2%). В слое 7 (0,07-0 м) преобладают сфагновые мхи и в меньшем количестве - гипновые мхи. Гипново-сфагновый вид торфа характеризуется средней степенью разложения и высокой зольностью (7,8%) (табл. 2).

Доголоценовые сильнольдистые оторфованные алевритистые пески с намытым детритом слоя 3, залегающие непосредственно под торфом, отнесены к озерным отложениям. Вскрытые под торфяником и озерными отложениями алевритовые пески подвергались протаиванию и проседанию, о чем свидетельствует пятнистая окраска за счет окисных (охристых) и закисных (сизовато-серых, черных) соединений железа и перемятые слои. Криотекстуры алевритовых и сильноалевритовых песков снизу вверх по разрезу сменяются от массивных до неполносетчатых и сетчатых, что свидетельствует об эпигенетическом промерзании отложений. Эти отложения, вероятно, являются таберальным комплексом [Каплина, 2009], выделяемым под отложениями термокарстовых озер. Наличие таберального комплекса доказывает принадлежность торфяника к осушенным озерным котловинам в стадии зарастания – хасыреям. Заболочивание и зарастание озера началось в финале сартанского периода. В разрезе В7-16 нижний слой торфа на контакте с минеральными грунтами имеют в своем основании автохтонный древесный горизонт. Остатки древесины, по-видимому, были захоронены в торфе на заболоченном берегу осушаемой озерной котловины, о чем свидетельствует также залегание стволов на границе с минеральными грунтами.

Торфяной горизонт накопился в хасырее, в основном, в пребореальный и бореальный периоды за ~ 1 тыс. лет. Только в верхнем слое сохранился торф, сформированный в конце атлантического периода.

В разрезе В7-16 нижние слои торфа характеризуются наибольшей зольностью, что свидетельствует о низинном типе болота на минеральных грунтах. Высокая степень разложения (52%) на глубине 0,4-0,45 м связана с частым промерзанием-протаиванием. Ботанический состав торфяника отражает увлажненные условия торфообразования, характерные для современных заболоченных понижений [Kuznetsova et al., 2019].

В другом хасырее в пределах ключевого участка № 1 (рис. 14, А, Б), поверхность которого расположена ниже на 1-2 м, чем в вышеописанном, изучены разрезы В8-17,18,19,20 (рис. 14, А), характеризующие строение полигонов и межполигональных понижений, сложенных торфом и вмещающих льды разного генезиса.

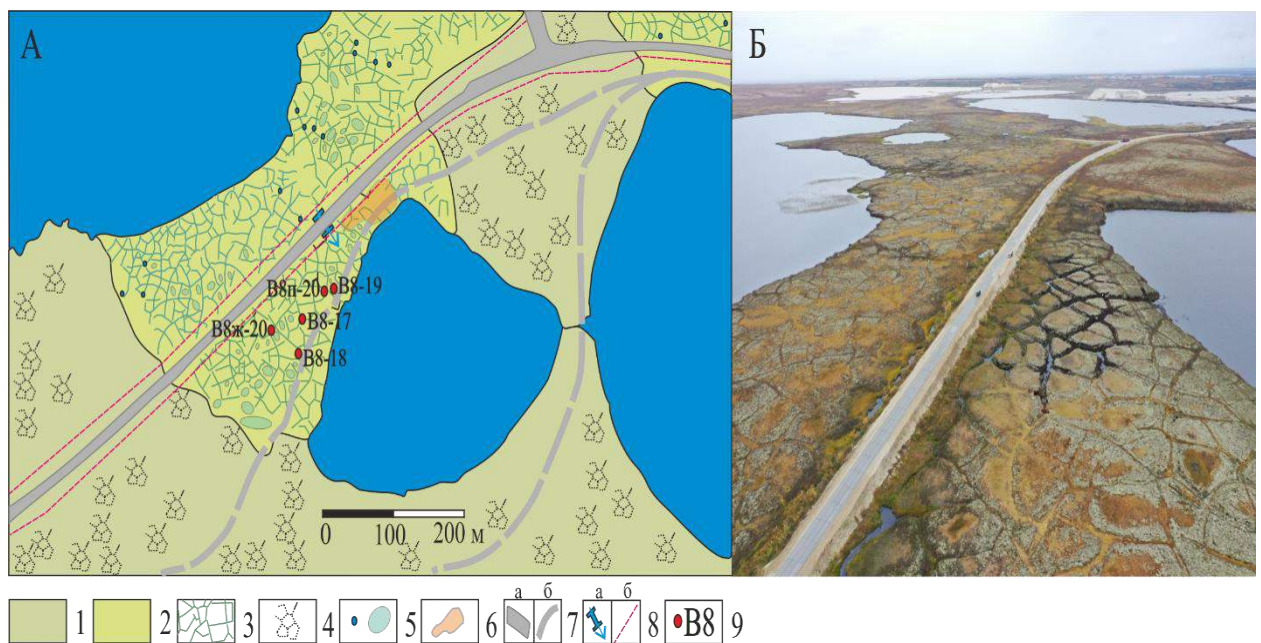


Рис. 14. Схема расположения разрезов в пределах ключевого участка исследований (А); общий вид полигонального торфяника (фото Р.Р. Хайруллина) (Б). 1 - водораздел; 2 - хасыреи; 3 - полигональный рельеф в низинах; 4 - полигональный рельеф на возвышенностях; 5 - полигональные ванны и обводненные просадки; 6 – зона пожара; 7 - дорога (а), заросшие колеи (б); 8 - водопропускная труба (а), границы насыпи и придорожных понижений (б); 9 - номера разрезов

Несмотря на интенсивное разрушение массива торфяниках, на полигонах выражены валики, полигональные ванны и черные органические пятна-медальоны (рис. 15).



Рис. 15. Органическое пятно-медальон на ключевом участке № 1

**Разрез В8-17** в межполигональном понижении, видимой мощностью 2,4 м, включает снизу вверх (рис. 16):

Слой 1 [2,3-0,7] – торф автохтонный темно-коричневый и черный из мхов, тонких веточек и стеблей растений. Слои торфа изогнуты вверх вдоль ледяной жилы. Криогенная текстура торфа массивная, базальная, корковая, гнездовая (0,5-2,0 см) и шлировая (толщина шлиров 2-25 см). Слой 1 автохтонного торфа характеризуется изменениями ботанического состава. На глубине 2,0-2,3 м хвощево-ивовый вид торфа характеризуется наибольшей степенью разложения (45%) и средней зольностью. На глубине 1,4-1,5 м преобладают остатки осок, встречаются сфагновые и гипновые мхи.

Пушицево-осоковый вид торфа обладает слабой степенью разложения и средней зольностью. На глубине 0,8-0,9 м преобладают сфагновые мхи, характеризуется наименьшей степенью разложения (9%) и низкой зольностью. Вид торфа - сфагновый. По радиоуглеродным датировкам торф слоя 1 относится к первой половине голоцена (рис. 16; табл. 3).

Слой 3 [0,12-0,7] – представлен переслаиванием линз и прослоев торфа из мхов темно-оранжевого рыхлого и темно-коричневого плотного торфа, толщина линз и прослоев 2-6 см, криотурбированный - с изогнутыми, перемятыми и смешанными слоями разного цвета. В межполигональном понижении торф сверху талый, с глубины 0,5 м (дата измерения: 11.08.2017) - мерзлый льдистый (рис. 16); включает прожилки, линзы и шлиры льда с многочисленными пузырьками воздуха и верхнюю часть ПЖЛ с клиновидными ростками. В пределах полигона шлиры льда в торфе в целом параллельны поверхности, приурочены к контакту с подстилающим торфом, а ближе к жилам изогнуты вверх. Кроме шлиров мерзлый темно-оранжевый торф вмещает термокарстово-полостной лед и линзы сегрегационного льда.

По глубине и флористическому составу прослой темно-коричневого плотного и темно-оранжевого рыхлого торфа характеризуются разной зольностью и степенью разложению (табл. 4). Мерзлый сфагновый торф на глубине 0,5-0,55 м характеризуется низкой степенью разложения и средней зольностью. В талом торфе на глубине 0,4-0,5 м преобладают хорошо сохранившиеся веточки и листья сфагновых и гипновых мхов, встречается кора кустарничков. Слой сфагнового торфа обладает высокой степенью разложения и средней зольностью. На глубине 0,34-0,4 м преобладают гипново-пушицевый остатки, встречаются остатки кустарничков. Слой характеризуется средней степенью разложения и низкой зольностью. Торф на глубине 0,26-0,34 м характеризуется преобладанием остатков травянистых растений с присутствием остатков гипновых мхов и кустарничков. Пушицево-осоковый торф обладает средней степенью разложения и низкой зольностью. На глубине 0,2-0,26 м сфагновый торф характеризуется средней

степенью разложения и низкой зольностью. На глубине 0,12-0,2 м сфагновый торф обладает низкой степенью разложения и зольности. Колебания степени разложения и зольности торфа связаны с изменениями режима обводнения, активностью микробиологических процессов [Ривкина и др., 2006] и промерзанием.

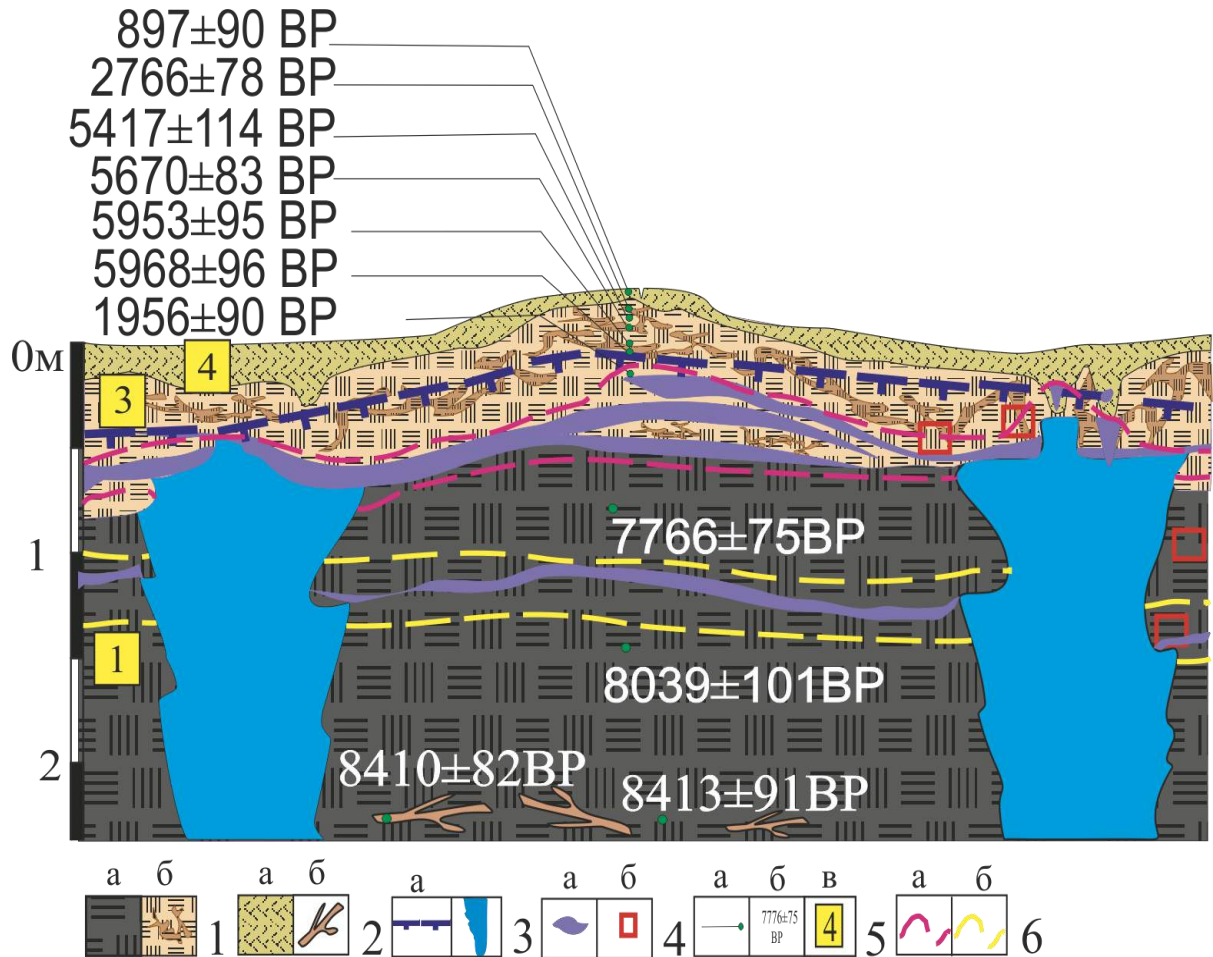


Рис. 16. Криолитологический разрез В8-17. Условные обозначения: 1-2а - слои торфа (см. описание в тексте); 2б - корни деревьев; 3 - кровля многолетнемерзлых отложений (а), ледяные жилы (б); 4 - термокарстово-полостной лед и сегрегационный (а); места отбора проб (б); 5 - точки отбора проб на С14 (а), радиоуглеродные датировки (б) номер слоя (в); 6 - верхний промежуточный слой (а); нижний промежуточный слой (б). (Возраст приведен по Я.В. Тихонравовой [2019])

Криотурбированный торф слоя 3 имеет датировки в интервале времени 5,9-1,9 ВР (табл. 3). Об интенсивном перемешивании торфа свидетельствует молодая радиоуглеродная датировка торфа в разрезе В8-17 над термокарстово-полостным льдом, что связано с просадкой растительных

остатков с поверхности [Слагода, Кузнецова, Тихонравова, 2019]. На глубине 0,4-0,5 м высокая степень разложения сфагнового торфа, возможно, фиксирует реликтовую границу СТС.

Таблица 3. Радиоуглеродный возраст в разрезе В8-17 (Тихонравова [2019])

№ слоя	Лабораторный номер	Глубина, м	Радиоуглеродный возраст (BP)	Калиброванный возраст (cal BP)
4	ИМКЭС-14С1488	0-0,07	897±90	730-834
3	ИМКЭС-14С1487	0,07-0,12	2766±78	2779-2939
3	ИМКЭС-14С1459	0,12-0,2	5417±114	6169-6304
3	ИМКЭС-14С1486	0,2-0,26	5670±83	6392-6555
3	ИМКЭС-14С1456	0,26-0,34	5953±95	6667-6896
3	ИМКЭС-14С1470	0,34-0,4	5968±96	6673-6901
3	ИМКЭС-14С1509	0,4-0,55	1956±90	1781-1951
1	ИМКЭС-14С1462	0,8-0,9	7766±75	8446-8599
1	ИМКЭС-14С1473	1,4-1,5	8039±101	8722-9026
1	ИМКЭС-14С1454	2,2-2,3	8410±82	9403-9527
1	ИМКЭС-14С1477	2,2 -2,3	8413±91	9401-9530

Таблица 4. Вид торфа, зольность и степень разложения торфа разреза В8-17 (определение Кузнецовой А.О.)

№ слоя	Глубина, м	Вид торфа	Степень разложения, %	Зольность, %
4	0-0,07	Сфагновый	25	13,5
4	0,07-0,12	Сфагново-осоковый	40	10,1
3	0,12-0,2	Сфагновый	19	4,1
3	0,20-0,26	Сфагновый	22	4,2
3	0,26-0,34	Пушицево-осоковый	30	4,1
3	0,34-0,4	Гипново-пушицевый	28	3,8
3	0,4-0,5	Сфагновый	39	7,7
3	0,5-0,55	Сфагновый	10	5
1	0,80-0,90	Сфагновый	9	4,7
1	1,4-1,5	Пушицево-осоковый	19	5,2
1	2,2-2,3	Хвоцево-ивовый	45	5,1

Слой 4 [0-0,12] – мохово-растительный слой. На глубине 0,07-0,12 м преобладают осоково-сфагновый торф с высокой степенью разложения и высокой зольностью. На глубине 0-0,07 м торф содержит множество хорошо сохранившихся мхов и корешки современных кустарничков. Слой обладает средней степенью разложения и высоким показателем зольности. Вид торфа - сфагновый.

Основная изученная часть торфяника накопилась в атлантический период, а верхние слои в суббореальный и субатлантический периоды. Нижние слои вскрытого торфа в разрезе В8-17 на глубине 2,3 м содержат остатки древесины ивы, датированные концом бореального периода. По-видимому, в осушенных озерных котловинах, защищенных от ветра, в бореальном и атлантическом периоде формировалось редколесье. Захоронение древесных остатков, возможно, было вызвано затоплением. Низкие значения зольности и флористический состав торфяника В8-17 указывают на верховой тип болот во время торфонакопления. Высокая степень разложения в нижней части залежи обусловлена затоплением, в верхней части современного деятельного слоя связана с длительным нахождением в переувлажненном состоянии в субатлантический период за счет увеличения сезонного протаивания в теплых и влажных условиях, и уменьшения его глубины при похолоданиях [Архипов, Волкова, 1994].

**Разрез В8-18**, видимой мощностью 2 м с полигонально-жильными и термокарстово-полостными льдами, вскрыт в термоэрозионной промоине. Ширина просадки над жилой 2,8-3 м, бровка просадки выделена по светлому ягелю и оконтурена кустиками березки высотой от 0,18-0,5 м.

Разрез В8-18 мерзлого и талого торфа снизу вверх включает (рис. 17):

Слой 1 [2-0,7м] – торф темно-коричневый и черный автохтонный, вмещающий полигонально-жильный лед. Кровля ПЖЛ оплавлена и частично замещена термокарстово-полостным льдом.

Слой 3 [0,15-0,7 м] – представлен переслаиванием линз и прослоев торфа из мхов темно-оранжевого рыхлого и темно-коричневого плотного торфа,



мощность линз и прослоев 1-5 см, криотурбирован. В мерзлом торфе слоя присутствуют шпирьы и крупные включения термокарстово-полостого льды. Торф с глубины 0,5 м талый, над центром жилы выполняет просадку, связанную с неравномерным протаиванием.

Слой 4 [0-0,15 м] – представлен мохово-лишайниковой растительностью.

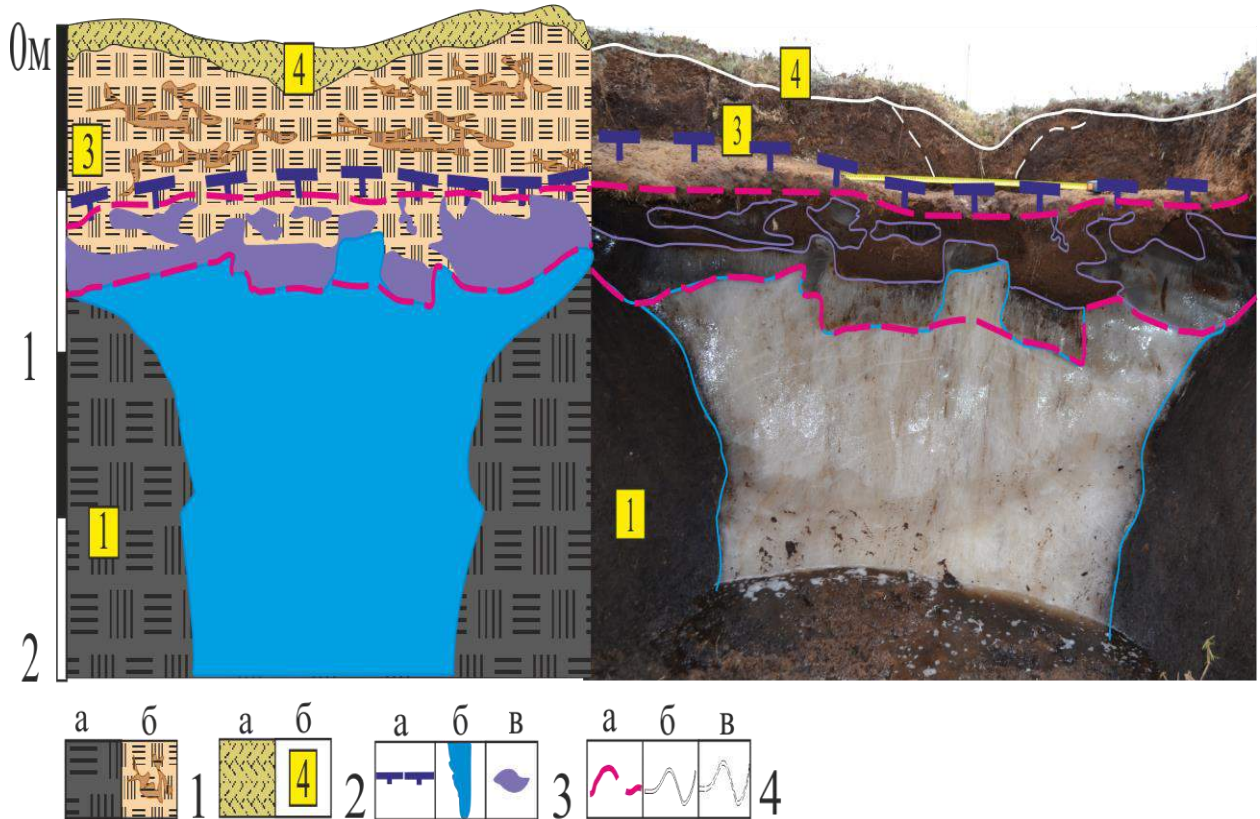


Рис. 17. Криолитологический разрез В8-18. Условные обозначения: 1-2а - слой торфа (см. описание в тексте); 2б - номер слоя; 3 - кровля многолетнемерзлых отложений (а), ледяные жилы (б); термокарстово-полосной лед и сегрегационный (в); 4 - верхний промежуточный слой (а); границы слоев (б), границы просадки (в)

В термоэрозионной промоине в 2019 году в поперечной и боковых стенках вскрыты сезонно-талый слой торфа, многолетнемерзлый торф с текстурообразующим льдом, ледяные жилы разного размера и новообразованные крупные включения льда (рис. 18, А, Б).

**Разрез 1/В8-19** (рис. 18) в стенке полигона снизу вверх вскрыл (рис. 19):

Слой 1 [0,8-0,5м] – черный и темно-коричневый рыхлый торф с корнями осоки до глубины 0,55 м оттаявший в 2019 г. Влажность увеличивается

сверху вниз от 436,4 до 507,6%, содержание органического вещества 96%. Плотность 0,89 г/см<sup>3</sup>. С глубины 0,55 м торф мерзлый слоистый по присутствию корней, стеблей растений, с горизонтально-волнистыми шпирями льда, корковыми, линзовидными и массивными криотекстурами; вскрытая мощность 0,8 м.

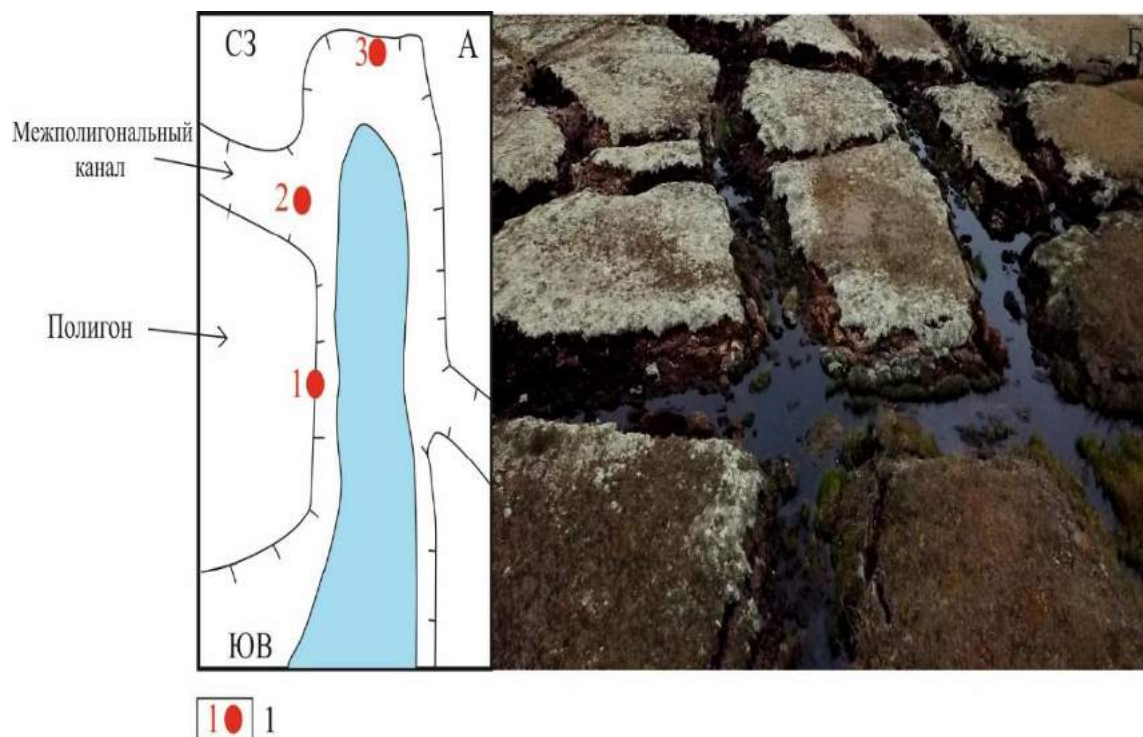


Рис. 18. План разрезов 1,2,3 В8-19. 1- места расположения разрезов (А), вид расчистки (Б). Условные обозначения: 1 - места расположения разрезов

Слой 2 [0,3-0,5 м] – плотный коричневый торф. Влажность изменяется от 351,9 до 381,6%, содержание органического вещества 96,2%. Плотность 0,94 г/см<sup>3</sup>;

Слой 3 [0,1-0,3 м] – переслаивание линз и прослоев торфа из мхов темно-оранжевого рыхлого и темно-коричневого плотного, толщина прослоев и линз 2-8 см; слоистость, в целом, повторяет микрорельеф поверхности полигона: мелковолнистая, плавная с затеками и просадками. Слой криотурбирован. Влажность изменяется от 341,1 до 392%, содержание органического вещества 96,4%. Плотность 0,99 г/см<sup>3</sup>.

Слой 4 [0-0,1 м] – мохово-растительный слой, представленный рыхлым зелёным и серым отмершим мхом, внизу серым с корневой системой

багульника и морошки. Слои талого торфа пересекает наклонная в сторону межполигонального понижения сомкнутая морозобойная трещина.

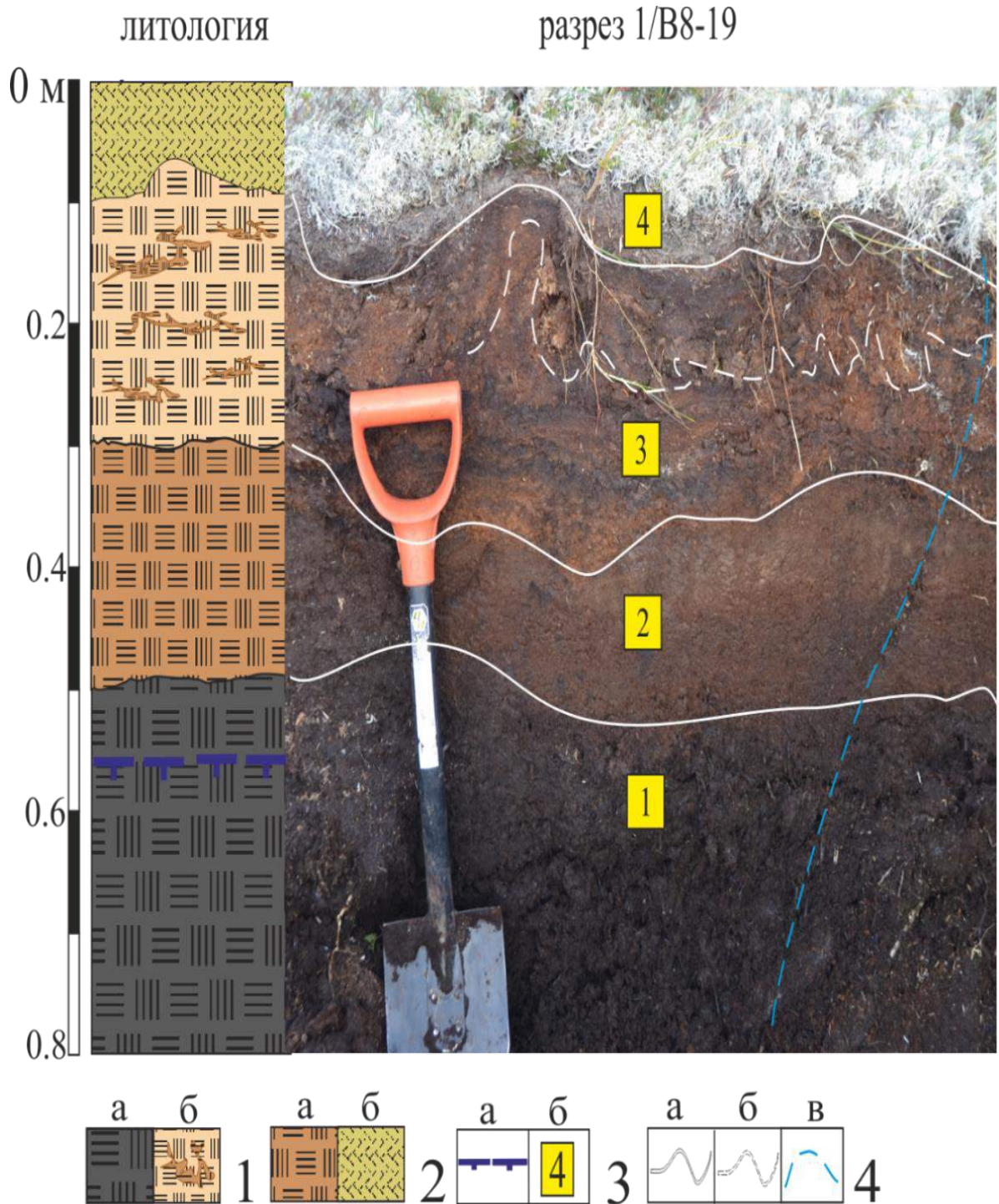


Рис. 19. Криолитологический разрез 1/В8-2019. Условные обозначения: 1-2 - слои торфа (см. описание в тексте); 3 - кровля многолетнемерзлых отложений (а); номер слоя (б); 4 - границы слоев (а); слоистость (б); морозобойная трещина (в)

**Разрез 2/В8-19** (рис. 18) в межполигональном понижении (с аналогичным разрезу 1/В8-19 строением). Под СТС с глубины 0,6 м вскрыта

ПЖЛ с затеком торфа (обозначена цифрой 5 на рис. 20). Жила льда имеет неровную, неравномерно сниженную подтаявшую кровлю, сверху шириной до 0,2 м, затек выполнен темно-коричневым торфом слоя 1 (рис. 20).

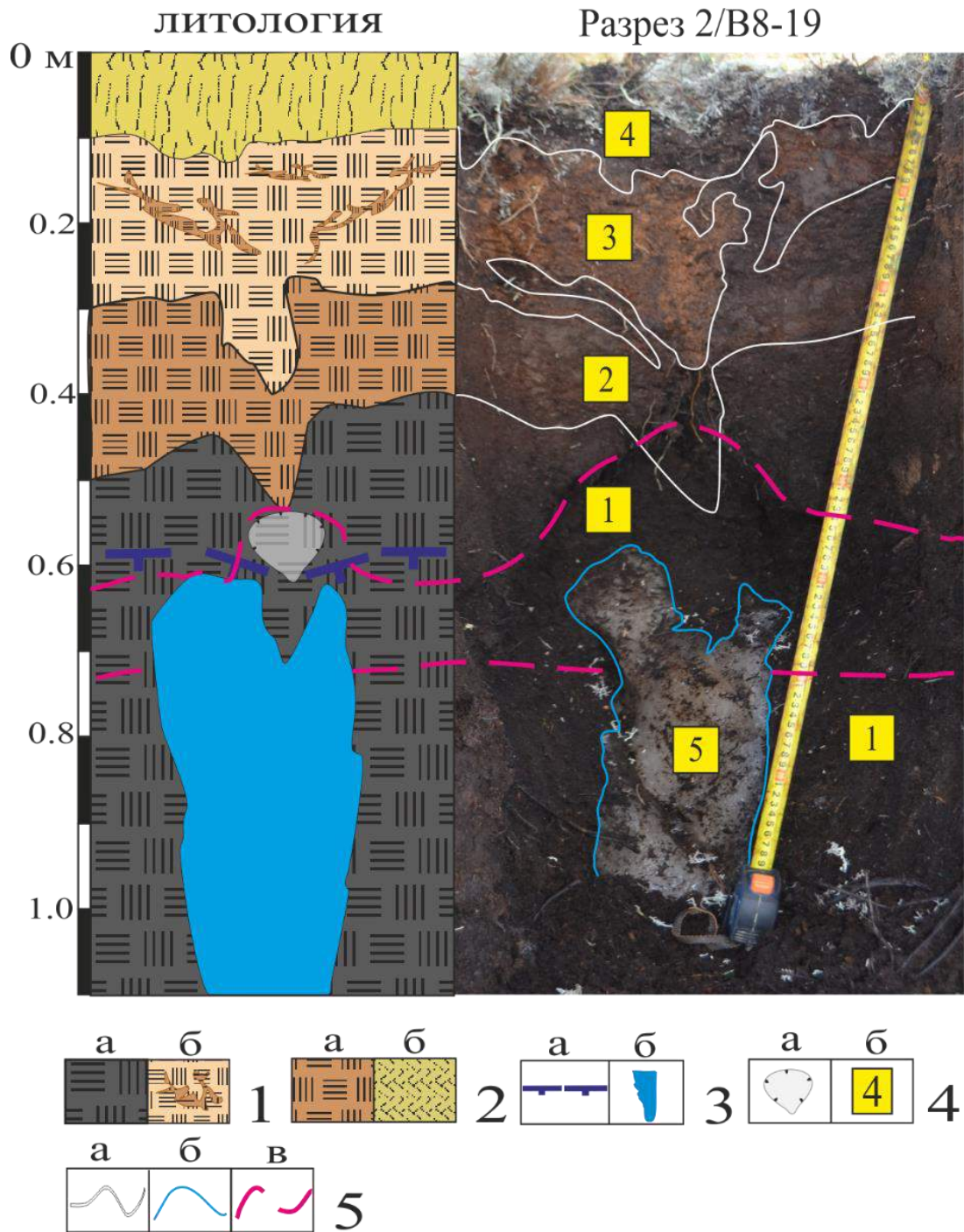


Рис. 20. Криолитологический разрез 2/В8-19. Условные обозначения: 1-2 - слои торфа (см. описание в тексте); 3 - кровля многолетнемерзлых отложений (а); ледяные жилы (б); 4 - полость (а); номер слоя (б); 5 - границы слоев (а); границы полигонально-жильных льдов (б); границы верхнего промежуточного слоя (в)

Над затеком в ПЖЛ в СТС четко выделяется затек, сложенный торфом слоя 3, по вытаявшей верхней части жилы. Слой 3 сильно криотурбирован за счет просадок. Глубина протаивания черного разложенного торфа слоя 1 увеличивается до 60 см.

**Разрез 3/В8-19** (рис. 18) расположен под межполигональным понижением над крупной ледяной жилой. В разрезе снизу вверх вскрыты (рис. 21):

Слой 1 [2,1 - 0,55-0,4 м] – торф коричневый и черный талый плотный до глубины 0,4-0,55 м и ниже многолетнемерзлый льдистый рыхлый автохтонный из мхов, стеблей трав, веточек кустарничков. В СТС над жилой расположена корытообразная просадка, шириной 1,45-1,9 м, выполненная рыхлым желтым мхом слоя 3а. В центре просадки клиновидная псевдоморфоза шириной 0,7 м, выполненная наклонными вниз прослоями торфа слоев 1, 2, 3. Отмечена зияющая трещинка в центре канавы от вытаявшей элементарной жилки.

Слой 2 – коричневый плотный торф, выделенный в разрезах 1 и 2/В8-19 выклинивается над жилой в межполигональном понижении, в межполигональном понижении присутствуют лишь отдельные включения оползшего с полигонов плотного коричневого торфа в слое 3.

Слой 3 [0,15 - 0,4-0,55 м] – переслаивание линз и прослоев торфа из мхов темно-оранжевого рыхлого и темно-коричневого плотного, мощность линз и прослоев 2-7 см. Непосредственно под межполигональным понижением слой вверху включает линзу желтого рыхлого неразложенного торфа из мхов (3а). Нижняя граница слоя неровная, в центре разреза достигает кровли ПЖЛ. Слой талый до глубины 0,4 - 0,55 м, с глубины 0,4-0,55 м многолетнемерзлый с горизонтально-волнистыми шлирами льда, корковыми, линзовидными и массивными криотекстурами;

Слой 4 [0-0,15 м] – мохово–растительный слой, представленный рыхлым мхом, лишайниками и отмершими серыми прослоями мхов и с корнями.

Лед клиновидной формы (рис. 21) с видимым вертикальным размером 1,5 м, шириной в кровле 0,8 м. Ассиметричная кровля ПЖЛ расположена на глубинах 0,5 и 0,6 м, в ее центральную часть до глубины 0,8 м врезан желоб, по которому текут надмерзлотные воды СТС. В правой стенке жилы на глубине 0,8-1,15 м выражено плечико, к которому примыкают шлиры льда в торфе толщиной до 0,1-0,4 м; в левой боковой стороне жилы к плечу на глубине 1,6-1,8 м примыкает включение термокарстово-полостного льда мощностью до 0,8 м.

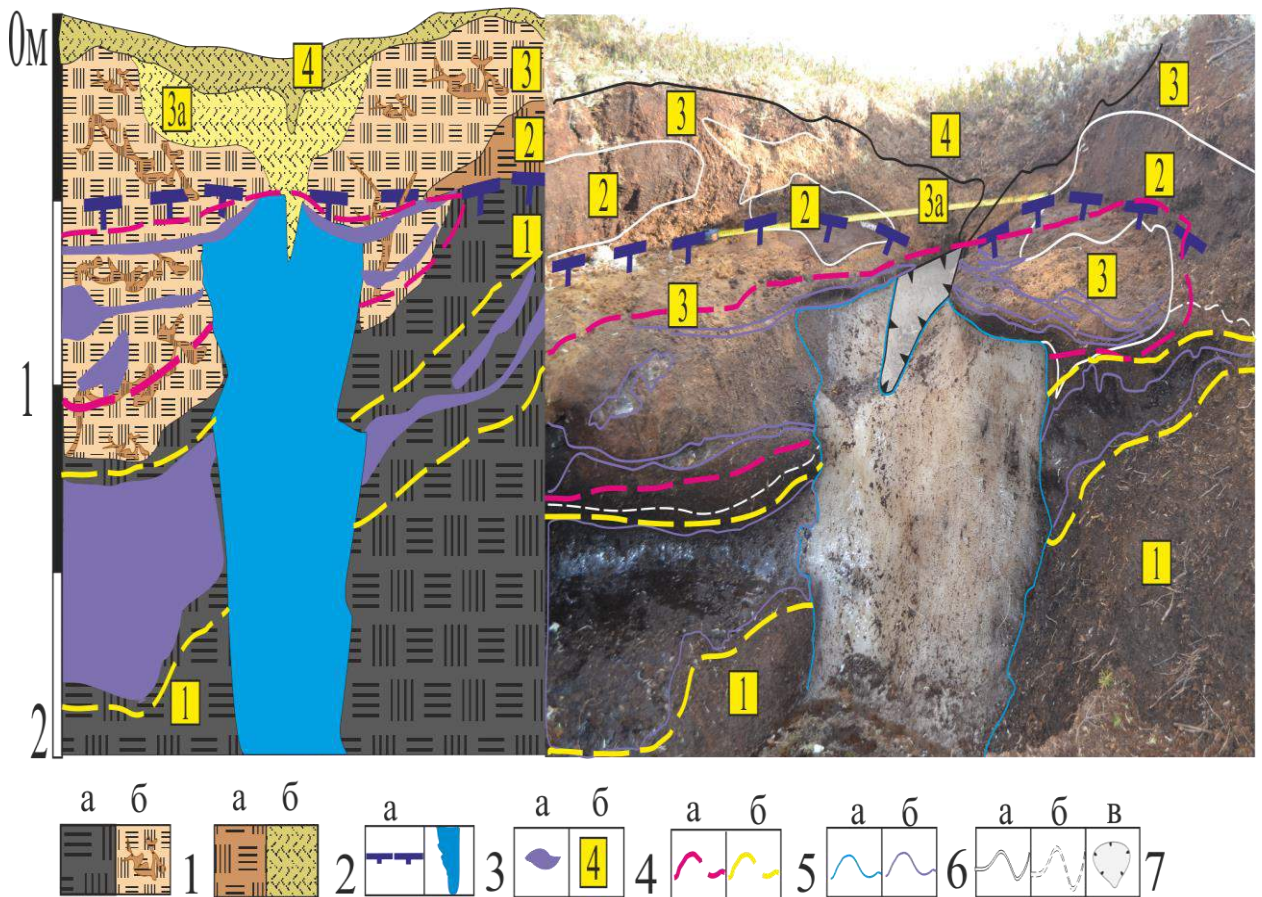


Рис. 21. Криолитологический разрез 3 расчистки В8-19 (упрощенная схема).  
Условные обозначения: 1-2 - слои торфа (см. описание в тексте); 3 - кровля многолетнемерзлых отложений (а); ледяные жилы (б); 4 - термокарстово-полостной и шлиры сегрегационного льда (а); номер слоя (б); 5 - верхний промежуточный слой; нижний промежуточный слой (б); 6 - границы полигонально-жильных льдов (а); границы термокарстово-полостных и сегрегационных льдов (б); 7 - границы слоев (а); предполагаемые границы слоев (б); желоб (в)

**Разрез В8п-20** в полигоне (рис. 22) вскрыл снизу вверх:

Слой 1 [2,0-0,5м] – торф автохтонный, черный, рыхлый, из мхов с корнями осоки, слоистый за счет чередования мхов, корней, стеблей растений.

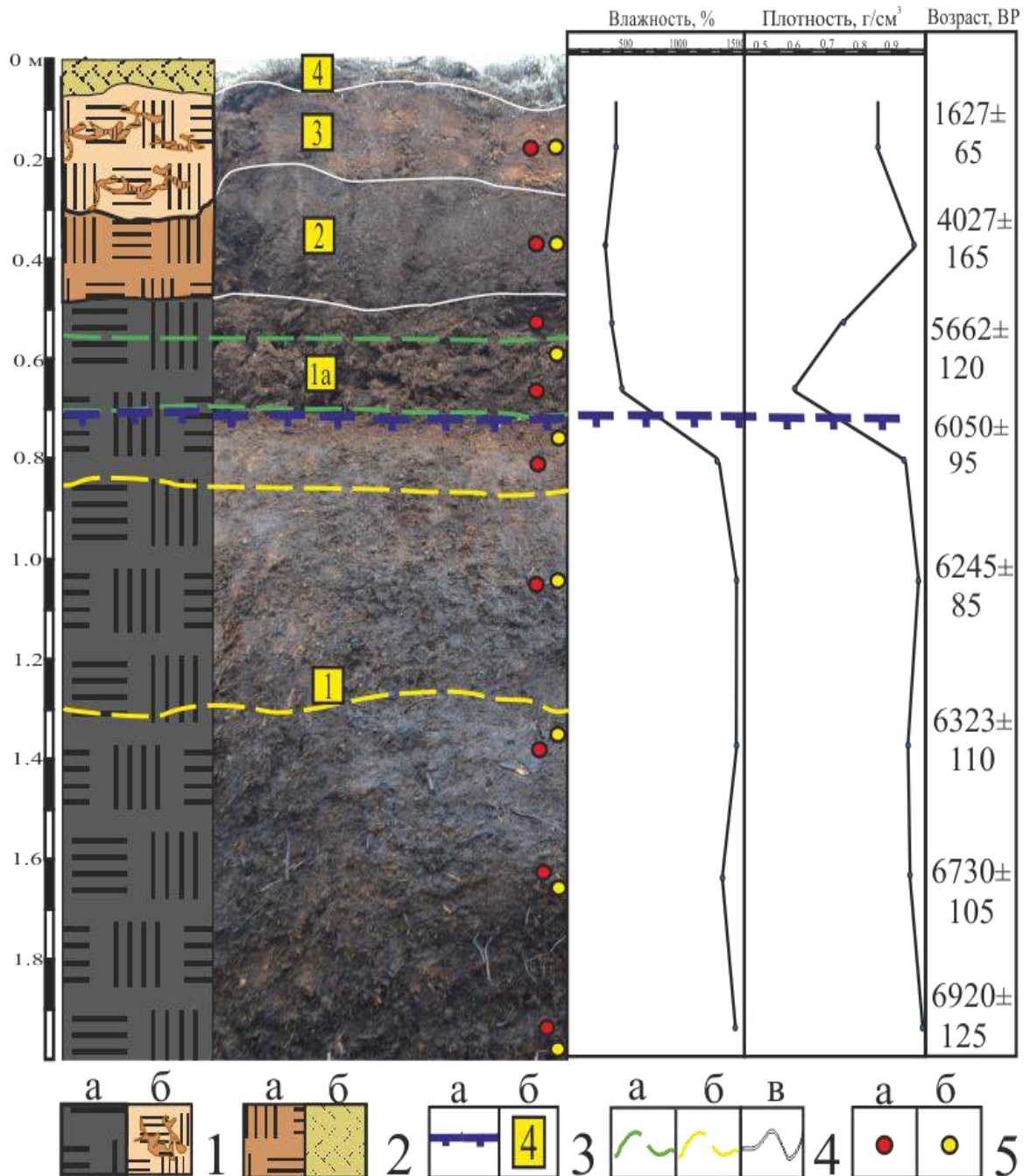


Рис. 22. Криолитологическое строение разреза В8п-20. Условные обозначения: 1-2 - слои торфа (см. описание в тексте); 3 - кровля многолетнемерзлых отложений (а); номер слоя (б); 4 - оттаявшие отложения верхнего промежуточного слоя (а); нижний промежуточный слой (б); границы слоев (в); 5 – места отбора проб на плотность и влажность (а), места отбора проб на С14

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/см<sup>3</sup>; в торфе со шлирами льда влажность 1238-1909%, плотность 0,98-0,99 г/см<sup>3</sup>. В талой части слоя (1а) влажность торфа уменьшается снизу вверх от 519 до 363%; плотность составляет внизу 0,54-0,59 г/см<sup>3</sup>, вверху 0,69-0,84 г/см<sup>3</sup>.

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/см<sup>3</sup>.

Слой 3 [0,05-0,25 м] – переслаивание слойков 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/см<sup>3</sup>.

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

В разрезе В8п-20 послойно отобраны пробы торфа на ботанический состав (табл. 5).

На глубине 1,9-2,0 м в слое 1 вид торфа - сфагново-гипновый. На глубинах 1,7-0,48 м распространены гипновый, сфагновый, сфагново-осоковый и осоково-гипновый виды торфа. Для слоя 1 характерны колебания степени разложения и зольности.

В слое 2 на глубине 0,3-0,48 м преобладает пушицевый вид торфа. Этот слой обладает самой высокой степенью разложения 65% и низкой зольностью.

В слое 3 на глубине 0,05-0,3 м распространен сфагновый вид торфа, который обладает низкой степенью разложения и зольностью.



В слое 4 на глубине 0-0,05 м вид торфа - сфагновый, встречаются корешки брусники. Этот слой обладает самой высокой зольностью 29% и высокой степенью разложения 37 %.

Таблица 5. Тип и вид торфа, зольность и степень разложения торфа разреза В8п-20 (определение Кузнецовой А.О.)

№ слоя	Глубина, м	Вид торфа	Тип торфа	Степень разложения, %	Зольность, %
4	0-0,05	Сфагновый торф	низинный	37	29
3	0,05-0,3	Сфагновый торф	верховой	12	4
2	0,3-0,48	Пушицевый торф	переходный	65	6
1	0,75 - 0,8	Сфагново-осоковый торф	верховой	14	4
1	1-1,1	Гипновый торф	переходный	15	8
1	1,3-1,4	Сфагновый торф	низинный	17	10
1	1,6-1,7	Гипновый торф	переходный	9	7
1	1,9-2	Сфагново-гипновый торф	низинный	15	12

Вскрытая часть торфяника в интервале глубин 0,5-2,3 м накопилась в атлантический период, а верхние маломощные слои - в суббореальный и субатлантический периоды (рис. 21; табл. 6). Динамика состава и содержания растений-торфообразователей в разрезе, изменение в типах торфа от низинного к верховому (табл. 5) характеризуют смену условий: обводнение, зарастание водоема и постепенное осушение поверхности хасырея. Торф слоя 1 на глубине 0,48-0,75 м имеет низкую зольность и невысокую степень разложения, что может быть связано с его длительным пребыванием в многолетнемерзлом состоянии с момента сингенетического промерзания и, по-видимому, кратковременным протаиванием и промерзанием в первой половине субатлантического периода.

Таблица 6. Радиоуглеродный возраст в разрезе В8п-20

№ слоя	Лабораторный номер	Глубина, м	Радиоуглеродный возраст (BP)	Калиброванный возраст (cal BP)
3	ИМКЭС-14С2073	0,05-0,25	1627±65	1408-1548
2	ИМКЭС-14С2069	0,3-0,48.	4027±165	4349- 4657
1а	ИМКЭС-14С2060	0,5-0,7	5662±120	6309-6560
1	ИМКЭС-14С2067	0,75-0,8	6050±95	6782-7005
1	ИМКЭС-14С2072	1,0-1,1	6245±85	7154-7257
1	ИМКЭС-14С2054	1,3-1,4	6323±110	7157-7357
1	ИМКЭС-14С2066	1,6-1,7	6730±105	7505-7677
1	ИМКЭС-14С2058	1,9-2,0	6920±125	7662-7866

**Разрез В8ж2-20** в межполигональном понижении шириной более 2,5 м над крупной ледяной жилой (рис. 23), вскрыты снизу вверх:

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/см<sup>3</sup>; влажность торфа около термокарстово-полостного льда от 1015 до 1842%, плотность от 0,93 до 0,98 г/см<sup>3</sup>.

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 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 с локальной более глубокой полостью протаивания. Мерзлый темно-оранжевый торф имеет влажность от 599 до 4383%, его плотность изменяется от 0,91 до 0,96 г/см<sup>3</sup>. Темно-коричневый торф имеет влажность от 537 до 5430 %, плотность 0,91-1,0 г/см<sup>3</sup>. Талый

темно-оранжевый торф имеет влажность от 660 до 944%, плотность 0,82-1,04 г/см<sup>3</sup>. Талый темно-коричневый торф с влажностью 162-343%, отличается большей плотностью 0,95-1,16 г/см<sup>3</sup>; в инъекции над серединой жилы коричневый торф имеет более низкую плотность 0,81-0,9 г/см<sup>3</sup>. Нижняя граница слоя неровная (Приложение, табл. 12).

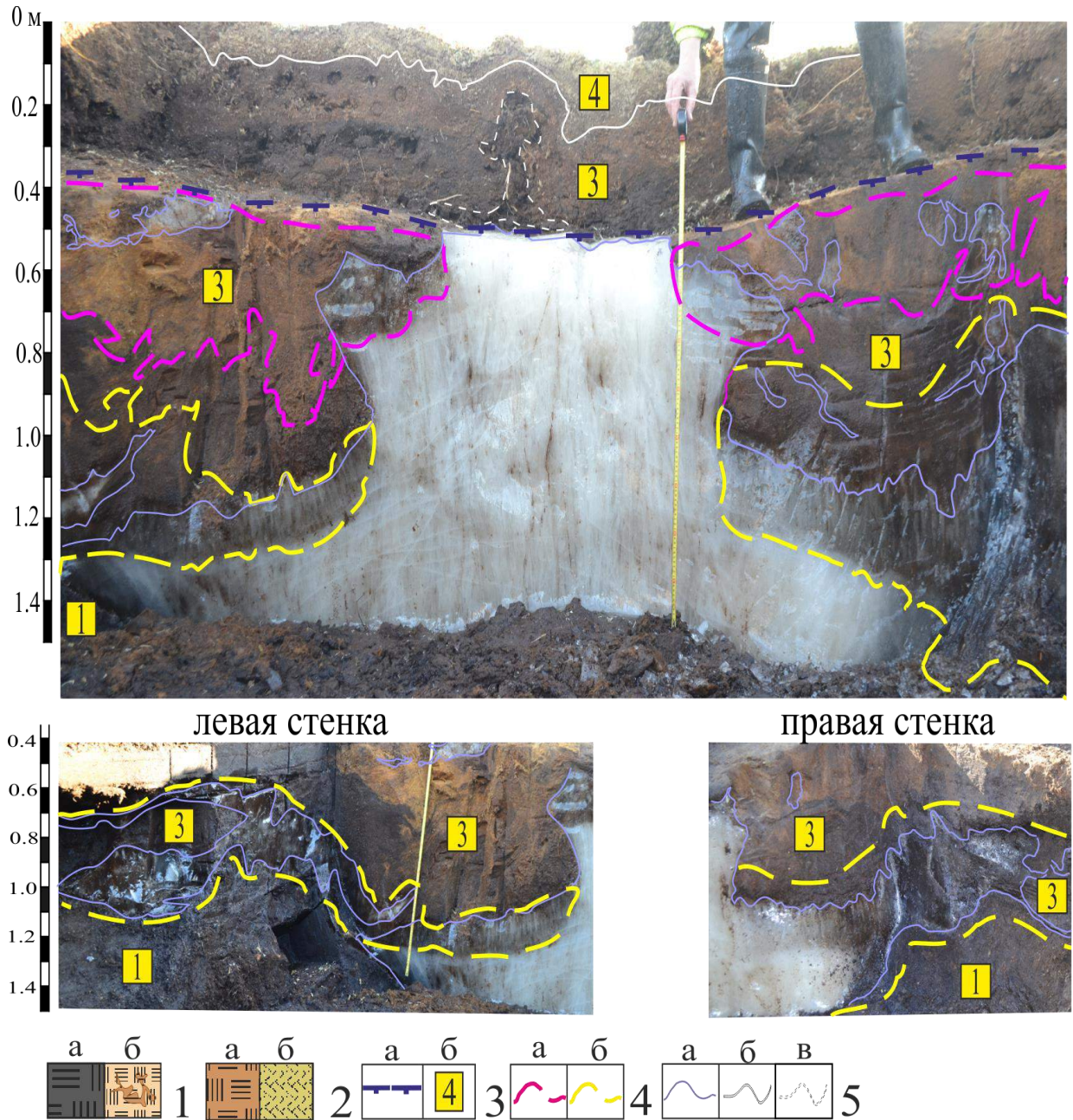


Рис. 23. Криолитологическое строение разреза В8ж2-20. Условные обозначения: 1-2 - слои торфа (см. описание в тексте); 3 - кровля многолетнемерзлых отложений (а), номер слоя (б); 4 - верхний промежуточный слой; нижний промежуточный слой (б); 5 - границы льдов (а); границы слоев (б); граница инъекции (в)

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

В разрезе торфяника выделены полигонально-жильный, термокарстово-полостной, инфильтрационно-сегрегационные и сегрегационный льды. Жила вертикально-полосчатого пузырчатого 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 шпирь прозрачного льда толщиной 10-11 см, залегающие в торфе полигона на глубине 0,85-1,15 м.

**Разрез В8ж1-20** в межполигональном понижении, вскрытой мощностью 1,4 м, представлен снизу вверх (рис. 24):

Слой 1 [1,4-1,1 м] – торф многолетнемерзлый льдистый рыхлый автохтонный из мхов, стеблей трав, веточек кустарничков. Влажность мерзлого торфа вмещающего жилу льда от 948 до 1038 %, плотность 0,96-0,98 г/см<sup>3</sup>.

Слой 2 – торф талый плотный коричневый из разложенных растительных остатков, залегаем в боковых стенках и выклинивается над жилой. Мощность от 0,25 до 0 м. Влажность коричневого торфа 191-249%, плотность 0,95-1 г/см<sup>3</sup>.

Слой 3 [1,1-0,2 м] – переслаивание линз и прослоев торфа из мхов темно-оранжевого рыхлого и темно-коричневого плотного, мощность линз и прослоев 1-8 см, с глубины 0,5 м мерзлый с горизонтально-волнистыми шпирями льда и термокарстово-полостным льдом, 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 598 до 839 %, плотность этого торфа от 0,93 до 0,96 г/см<sup>3</sup>. Темно-коричневый торф имеет влажность от 537 до 577 %, плотность 0,99-1,0 г/см<sup>3</sup>. Талый темно-оранжевый и коричневый плотный криотурбированный торф имеют влажность от 682 до 843 %, плотность 0,82-1,08 г/см<sup>3</sup> (Приложение, табл. 12). Слой 4 [0,2-0 м] – мохово-растительный слой представлен рыхлым мхом, лишайниками и отмершими серыми прослоями мхов с корнями.

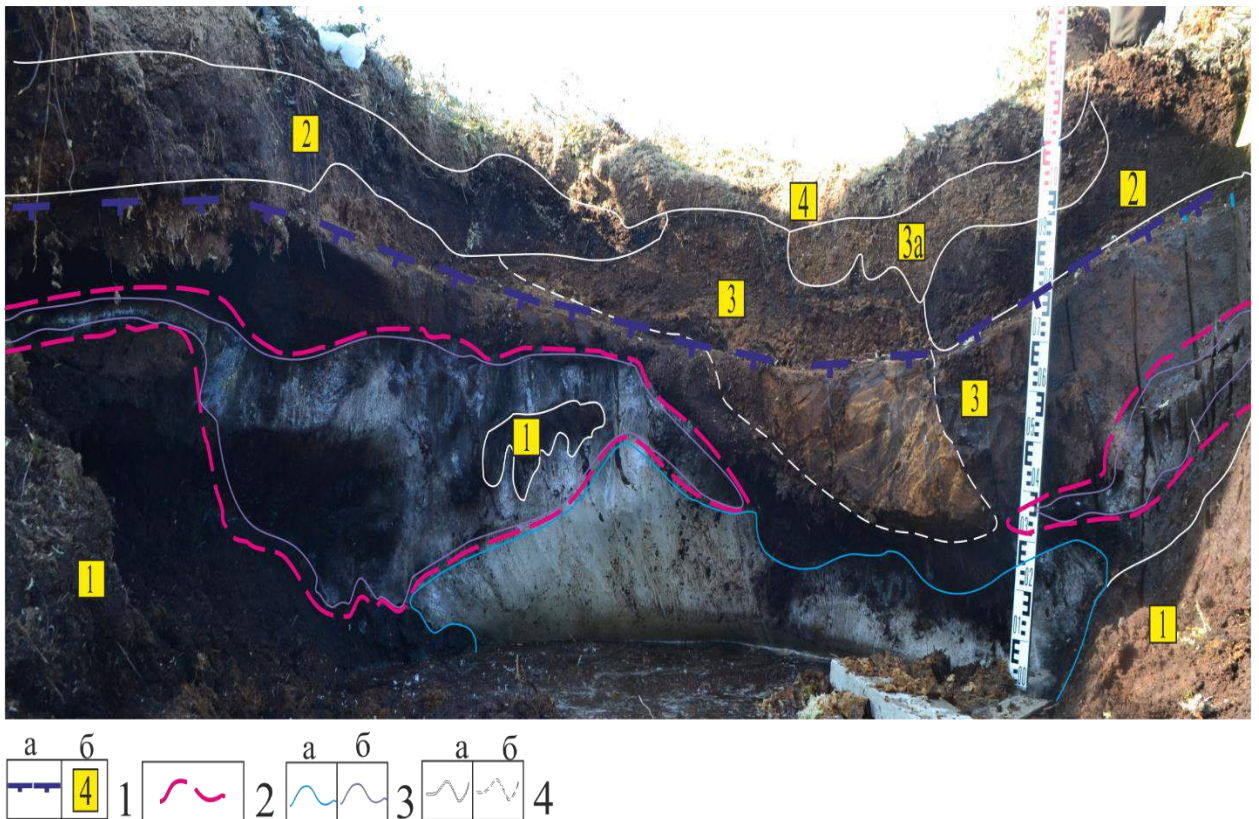


Рис. 24. Криолитологическое строение разреза В8ж1-20. Условные обозначения: 1 - кровля многолетнемерзлых отложений (а); номер слоя (б); 2 - верхний промежуточный слой; 3 - границы полигонально-жильных льдов (а); границы термокарстово-полостных и сегрегационных льдов (б); 4 - границы слоев (а); 4 - слоистость (б).

### Ключевой участок № 2

Хасырей с абс. отм. поверхности 6-7 м расположен в 20 км от с. Газ-Сале. С востока участок ограничен насыпью автомобильной дороги, с запада - мелководным озером. Превышение бортов, представленных останцами III равнины над торфяником, составляет 4-6 м. Участки плоскобугристого

полигонального торфа с кочковатым микрорельефом, полигональными ваннами и валиками по периферии разделены ложбинами стока (рис. 25).

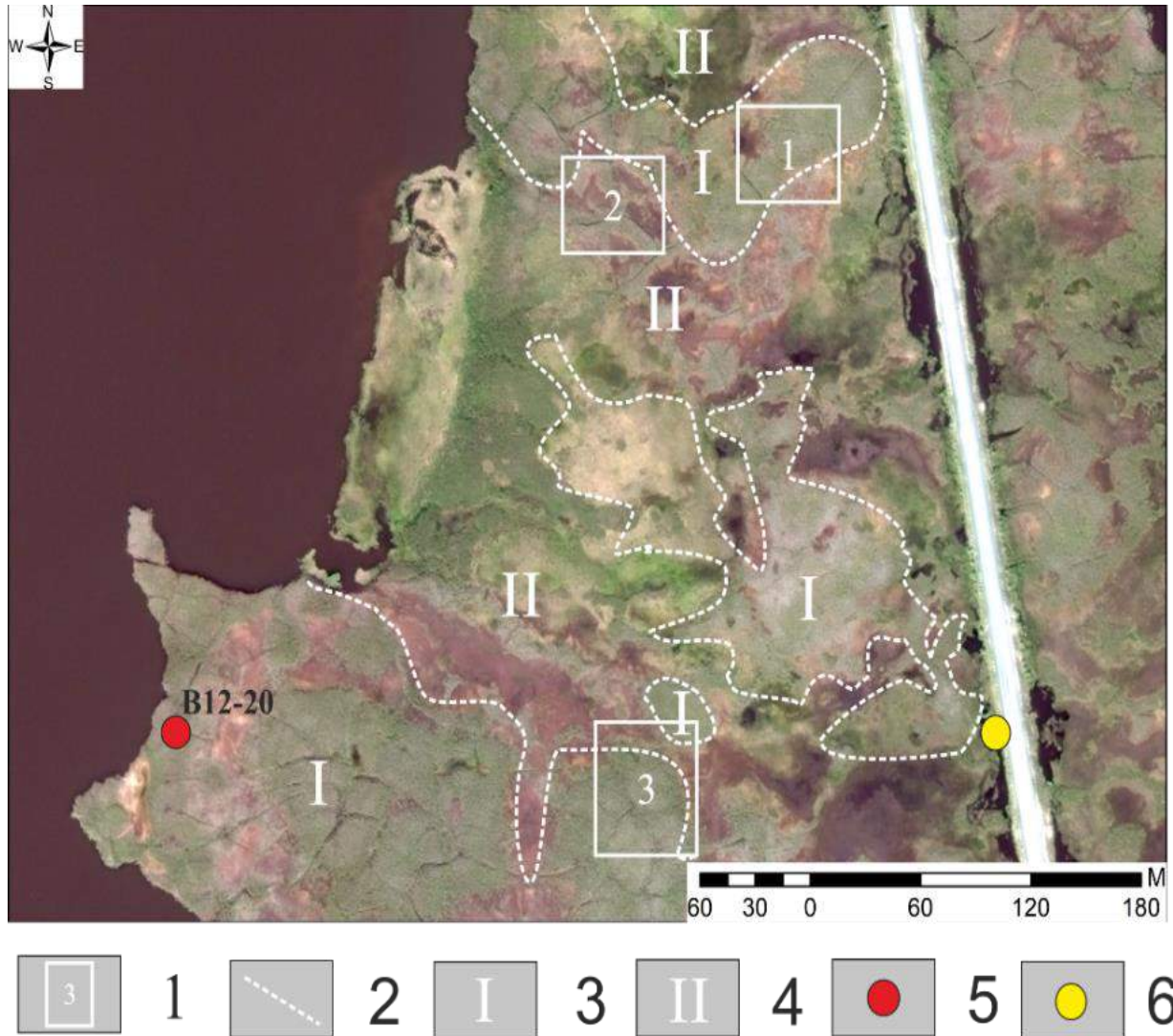


Рис. 25. Исследуемые площадки на ключевом участке 2. 1 - расположение и номера площадок; 2 - границы ложбин и возвышенностей; 3 - возвышенности; 4 - ложбины; 5 - месторасположения разреза; 6 - водопропускная труба

В ложбинах стока полигональный рельеф подчеркнут термоэрозионными межполигональным промоинами. На относительно повышенных участках торфяника хорошо выражен полигональный рельеф, осложненный кочкарником и многочисленными черными пятнами-медальонами. Полигоны имеют в основном трапецевидную и прямоугольную форму, а межполигональные понижения над ледяными жилами и морозобойные трещины имеют 2-х и 3-х лучевое сочленение.

Рельеф кровли мерзлых пород в пределах полигонов мелковолнистый, повторяет микрорельеф поверхности.

В пределах торфяника выделены 3 площадки с различной высотой поверхности и удаленностью от озера (рис. 25).

Округлые в плане возвышенности на юге участка, по-видимому, представляют плоские бугры пучения, на которых четко выражены полигоны с органическими пятнами-медальонами. Эти пятна-медальоны расположены как в центральных, так и краевых частях полигонов, причем приурочены к понижениям микрорельефа.

На площадке 1 полигоны прямоугольной и округлой формы размером от 17x22 до 25x38 м. Пятна-медальоны расположены в центрах полигонов, редко в широких межполигональных понижениях, имеют округлые формы, по краям полигона на валиках - вытянутую форму, поскольку часть органической массы стекала в канавы (рис. 26).

Площадка 3 приурочена к плоскому бугру, относительно возвышенна до 1,5 м над ложбинами стока. Полигоны на площадке имеют размеры 32x28 м, с более мелкой генерацией полигонов размером 10,8x7,7 м с кочкарным микрорельефом. Полигоны возвышаются на 0,1-0,3 м над широкими (1,2-1,5 м) плоскими межполигональными понижениями. СТС в полигоне до 0,51 м, в межполигональном понижении 0,52 м. Слившиеся органические пятна-медальоны занимают от 20% площади полигона, до 50-70% площади обрамляющих межполигональных понижений и осушенных полигональных ванн. Они имеют коричневый цвет за счет с отмершей растительности и окисленной органической массы. Ближе к озеру межполигональные понижения сливаются в ложбины, увлажнены, покрыты осокой [Королева и др., 2019].



Рис. 26. Стекающие в межполигональное понижение органические пятна-медальоны



Рис. 27. Слившиеся органические пятна-медальоны в центре полигона (ключевой участок 2, площадка 2)



**Разрез В12-20** в стенке полигона в термоэрозионной промоине, образованной при вытаивании ПЖЛ, вскрыты снизу вверх (рис. 28):

Слой 1 [2,2-1,8 м] – торф мерзлый черно-коричневый автохтонной из мхов с большим количеством корешков и стеблей растений, которые придают торфянику горизонтальную слоистость. Криогенные текстуры корковая, линзовидная и шпировая, со шпирями льда толщиной от 0,5 до 3-5 см. Шпиря льда окружены оранжевым торфом. Торф имеет влажность 1850-2093%, плотность 0,94-0,96 г/см<sup>3</sup>.

Слой 2 [1,8-1,5 м] – торф мерзлый автохтонный представлен переслаиванием преобладающего темно-коричневого и желтоватого торфа из мхов, послойно обогащен веточками, стеблями и корнями растений, уложенными горизонтально. Криогенная текстура массивная. Торф имеет влажность 1245-1464%, плотность 0,96 г/см<sup>3</sup>.

Слой 3 [1,5-0,75 м] – торф мерзлый автохтонный представлен переслаиванием преобладающего желто-коричневого и темно-коричневого торфа в основном из мхов с хаотично расположенными стеблями растений. Криогенные текстуры линзовидно-поясковая, корковая, нижнюю границу слоя маркирует шпир льда толщиной 2 см на глубине 1,5 м. Влажность этого слоя от 1077 до 2318%, плотность 0,95-0,97 г/см<sup>3</sup>.

Слой 4 [0,75-0,6 м] – торф талый автохтонный черный рыхлый со стеблями растений (оттаял в 2020 г). Имеет влажность 406-444%, плотность 0,6-0,65 г/см<sup>3</sup>.

Слой 5 [0,6-0,35 м] – торф автохтонный темно-коричневый уплотненный из мхов и разрушенных на мелкие фрагменты веточек, стеблей растений. Имеет влажность 343-377%, плотность – 0,66-0,69 г/см<sup>3</sup>.

Слой 6 [0,35-0,05 м] – торф темно-коричневый плотный с включениями светло-коричневого, криотурбированный, с корнями современных растений. Верхняя граница неровная с волнистыми внедрениями вверх и затеками вышележащего свежего мха. Имеет влажность 303-346%, плотность 0,7-0,76 г/см<sup>3</sup> (Приложение, табл. 12).

Слой 7 [0,05-0 м] – мохово-растительный покров, представлен мохово-лишайниковой и кустарничковой растительностью.

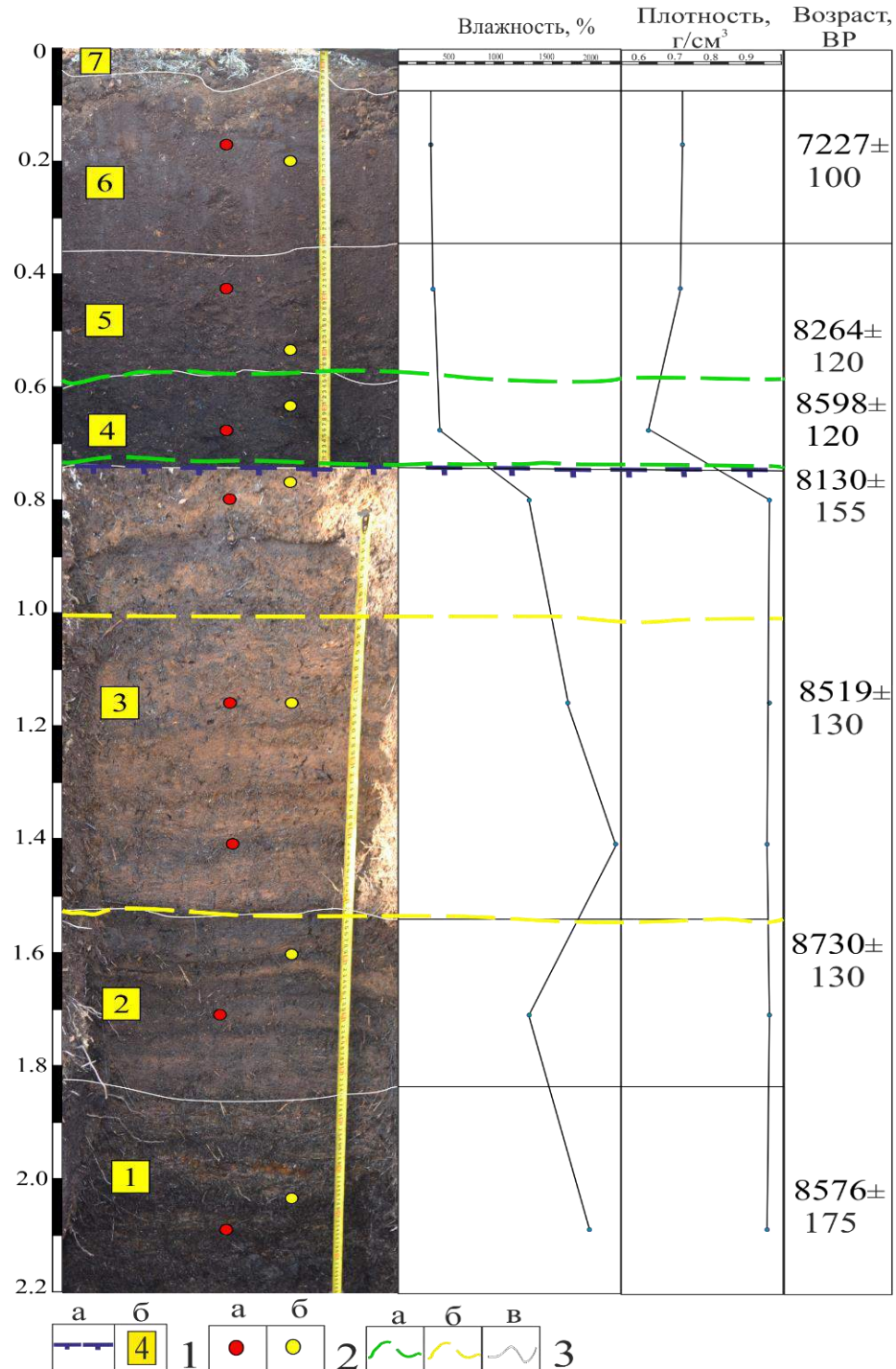


Рис. 28. Криолитологическое строение разреза B12-20. Условные обозначения: 1 - кровля многолетнемерзлых отложений (а); номер слоя (б); 2 - отбор проб на влажность и плотность (а), отбор проб на C14 (б); 3 - оттаявшие отложения верхнего промежуточного слоя (а); нижний промежуточный слой (б); границы слоев (в)

В разрезе В12-20 послойно отобраны пробы торфа (табл. 7). На глубине 1,8-2,2 м в слое 1 преобладают цельные листочки и веточки сфагновых мхов. Вид торфа - сфагновый. Внизу слоя торф обладает низкой зольностью и степенью разложения.

В слое 2 на глубине 1,5-1,8 м торф слагают остатки хвоща, листочки и веточки сфагновых мхов, вид торфа – хвощево-сфагновый. Хвощево-сфагновый торф характеризуется средней степенью разложения и высокой зольностью.

Торф слоя 3 на глубине 0,75-1,5 м содержит веточки и листочки сфагновых мхов. Вид торфа - сфагновый. Торф слоя 3 характеризуется низкой зольностью и низкой степенью разложения.

В торфе слоя 4 на глубине 0,7-0,75 м преобладают остатки хвоща и листочки с веточками сфагновых мхов. Вид торфа – сфагново-хвощевый. На глубине 0,6-0,7 м преобладают листья и веточки сфагновых мхов, присутствуют остатки травянистых и кустарничковых растений. Вид торфа – сфагновый. Торф слоя 4 характеризуется средней зольностью и средней степенью разложения.

В слое 5 на глубине 0,55-0,6 м преобладают веточки, листики сфагновых мхов и остатки листочков и коры березки. Встречаются остатки хвоща. Вид торфа - березово-сфагновый. На глубине 0,35-0,55 м преобладают листочки и веточки сфагновых мхов. Присутствуют остатки хвоща и кустарничков. Вид торфа - сфагновый. Торф слоя 5 характеризуется средней зольностью и средней степенью разложения.

На глубине 0,2-0,35 м в слое 6 преобладают остатки осок, встречаются пушица, березка и обрывки листочков сфагновых мхов. Вид торфа - осоковый. На глубине 0,1-0,2 м преобладают остатки травянистых растений и остатки березки. Вид торфа - березово-осоковый. В березово-осоковом торфе самая большая степень разложения 36%. В целом торф характеризуется высокой степенью разложения и зольностью

Табл. 7. Вид и тип торфа, зольность и степень разложения торфа разреза В12-20  
(определение Кузнецовой А.О.)

№ слоя	Глубина, м	Вид торфа	Тип торфа	Степень разложения, %	Зольность, %
Слой 7	0-0,1	Корешки современных растений, остатки гипновых мхов, пушиц и кустарничков	низинный	32	24
Слой 6	0,1-0,2	Березово-осоковый торф	низинный	36	15
Слой 6	0,2-0,3	Осоковый торф	низинный	26	15
Слой 6	0,3-0,35	Осоковый торф	низинный	29	16
Слой 5	0,35-0,55	Сфагновый торф	низинный	23	11,95
Слой 5	0,55-0,6	Березово-сфагновый торф	низинный	22	11,55
Слой 4	0,6-0,65	Сфагновый торф	низинный	21	11,76
Слой 4	0,65-0,7	Сфагновый торф	низинный	23	11,86
Слой 4	0,7-0,75	Сфагнуво-хвощевый торф	низинный	18	10,77
Слой 3	0,85-0,95	Сфагновый торф	верховой	8	2,86
Слой 3	0,95-1,05	Сфагновый торф	верховой	11	4,10
Слой 3	1,05-1,15	Хвощево-сфагновый торф	верховой	10	2,27
Слой 3	1,15-1,25	Хвощево-сфагновый торф	верховой	11	2,07
Слой 3	1,25-1,4	Сфагнуво-осоковый торф	верховой	12	3,48
Слой 3	1,4-1,5	Сфагнуво-осоковый торф	верховой	16	3,48
Слой 2	1,5-1,65	Хвощево-сфагновый торф	верховой	23	4,42
Слой 2	1,65-1,8	Хвощево-сфагновый торф	верховой	17	4,46
Слой 1	1,8-2,0	Сфагновый торф	верховой	8	4,57
Слой 1	2,0-2,1	Сфагновый торф	верховой	8	5,00
Слой 1	2,1-2,2	Сфагновый торф	верховой	15	2,82

Торф слоя 7 на глубине 0-0,05 м содержит корешки современных растений – торфообразователей, встречаются остатки гипновых мхов, пушиц и кустарничков. В этом слое самая высокая зольность 24% и достаточно высокая степень разложения 32%.

Накопление изученной части торфа происходило, в основном, в конце бореального и в первой половине атлантического периодов на фоне колебаний увлажненности (табл. 8), на которую указывают изменения ботанического состава растений - торфообразователей и смена типа болот с верхового на низинный вверх по разрезу (табл. 7).

Нижняя часть разреза торфяника формировалась в менее влажных условиях, чем верхняя. Нарушения последовательности радиоуглеродных датировок, вероятно, связаны с перемешиванием слоев при пучении и просадках в связи с колебаниями обводнения и относительного осушения поверхности хасырея на фоне сингенетического промерзания (табл. 8). Высокая степень разложения и зольность в верхних слоях указывают на большую обводненность территории, вероятно, в связи с колебаниями уровня вод озера, и длительного воздействия циклических процессов промерзания и протаивания в СТС.

Таблица 8. Радиоуглеродный возраст в разрезе В12-20.

№ слоя	Лабораторный номер	Глубина, м	Радиоуглеродный возраст (BP)	Калиброванный возраст (cal BP)
6	ИМКЭС-14С2059	0,2	7227±100	7962-8056
5	ИМКЭС-14С2053	0,55-0,6	8264±120	9122-9331
4	ИМКЭС-14С2055	0,6-0,65	8598±120	9468-9747
3	ИМКЭС-14С2062	0,65-0,7	8130±155	8971-9295
3	ИМКЭС-14С2046	1,15-1,2	8519 ±130	9406-9675
2	ИМКЭС-14С2107	1,5-1,65	8730±130	9543-9905
1	ИМКЭС-14С2044	2,0-2,1	8576±175	9415-9818

## 2.4. Типы льдов в полигональных торфяниках

Для определения разнообразия криогенного строения торфа были изучены разные включения и залежи льдов. В торфянике отобраны ориентированные по отношению к поверхности и к выходу в стенке промоины монолиты четырех морфологических и генетических разновидностей льда - ПЖЛ, термокарстово-полостного, сегрегационных и инфильтрационно-сегрегационных шлиров льда. Из них были изготовлены прозрачные пластины и шлифы льда толщиной 0,5-1 мм, в трех срезах: вертикальные фронтальный «А», поперечный «В»; горизонтальный «С».

**Полигонально-жильный лед** с затеком торфа в центре отобрана из левой стенки расчистки 2/В8-19 с глубины 0,6-0,9 м (рис. 29).

В срезе А выделяется зона, сложенная элементарными жилками и контактные зоны около затека торфа в центре ПЖЛ и в боковой части жилы на контакте с вмещающим автохтонны торфом (рис. 29).

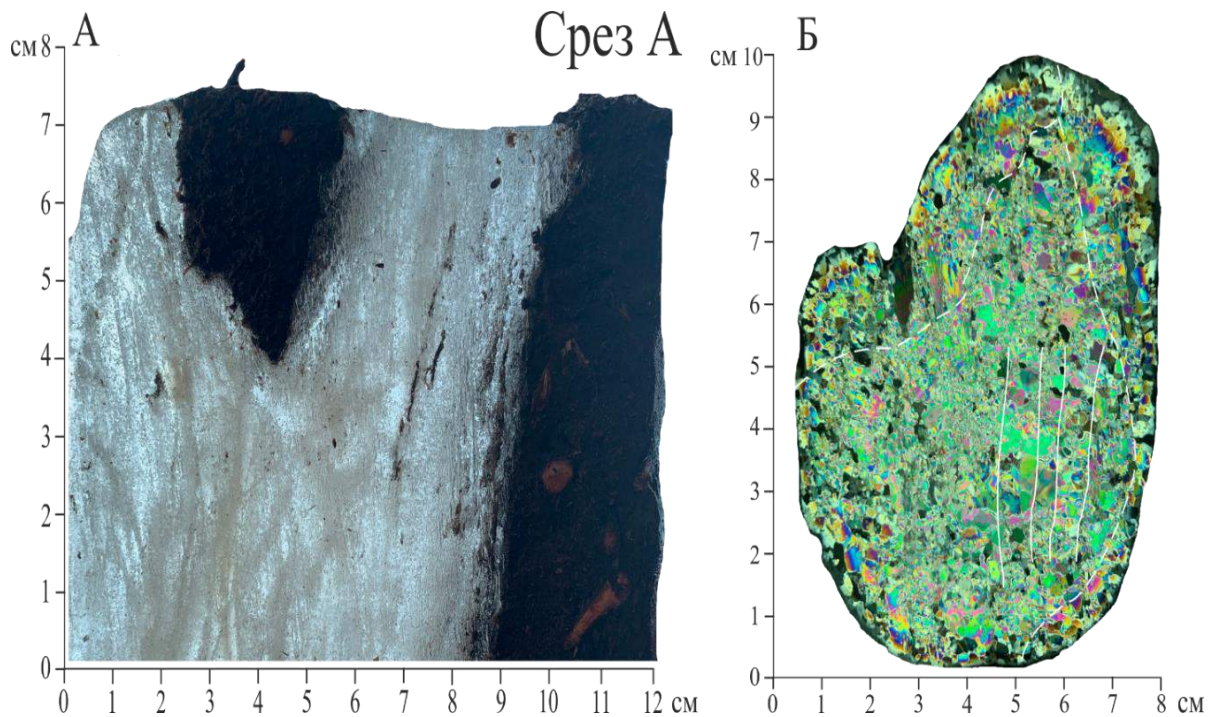


Рис. 29. Жильный лед в прозрачном шлифе с затеком торфа - псевдоморфозой по вытаявшей части ПЖЛ (А), структурно-текстурные особенности ПЖЛ с элементарными жилками в шлифе в поляризованном свете (Б). Сплошные линии - границы элементарных жилок, пунктирные - границы приконтактных зон

В центральной части ПЖЛ, между приконтактными зонами льда выявлены многочисленные элементарные жилки разной ширины от 0,5 до 1,5 см. Кристаллы изометричные, смыкаются в осевых швах, часть кристаллов имеют пятиугольную форму размером от 1 до 5 мм. Выделяются участки с очень мелкими кристаллами, приуроченные к скоплениям пузырьков, округлой и цилиндрической формы.

Приконтактные зоны с большим количеством затеков торфа представлены более крупными кристаллами, вытянутыми к фронтам промерзания сверху и сбоку в направлении температурного градиента между торфом и льдом. Самые крупные и удлиненные в вертикальном направлении кристаллы расположены вокруг затека торфа в центре ПЖЛ.

В шлифе торф коричневый с большим количеством свежих древесных остатков, стволики лежат горизонтально к поверхности. Вокруг стволиков размером до 0,5 см присутствуют корки льда. Между коричневым автохтонным торфом и приконтактной зоной льда жилы присутствует черный торф, толщиной 0,3-0,5 см.

Присутствие ПЖЛ - один из признаков сингенетического промерзания торфа в раннем голоцене, а торфяные псевдоморфозы в их кровле - показатель локального более глубокого протаивания, сопровождавшего промерзание торфа.

**Термокарстово-полостной лед** над кровлей ПЖЛ сложен прозрачным льдом с включениями рассеянных растительных остатков и пузырьков воздуха. Во льду встречены целые неразложенные мох и веточки (рис. 30).

Кристаллы льда крупные, удлиненные в поляризованном свете в срезе А имеют размеры до 10 см, в срезе В – до 20 см; в срезе С - изометричные и уплощенные кристаллы размером от 2-3 до 5-7 см, между которыми защемлены пузырьки воздуха. При образовании термокарстово-полостного льда из свободной воды, где есть включения торфа, растущие кристаллы

могут раздвигать торф и образовывать идиоморфную форму кристаллов (рис. 31).

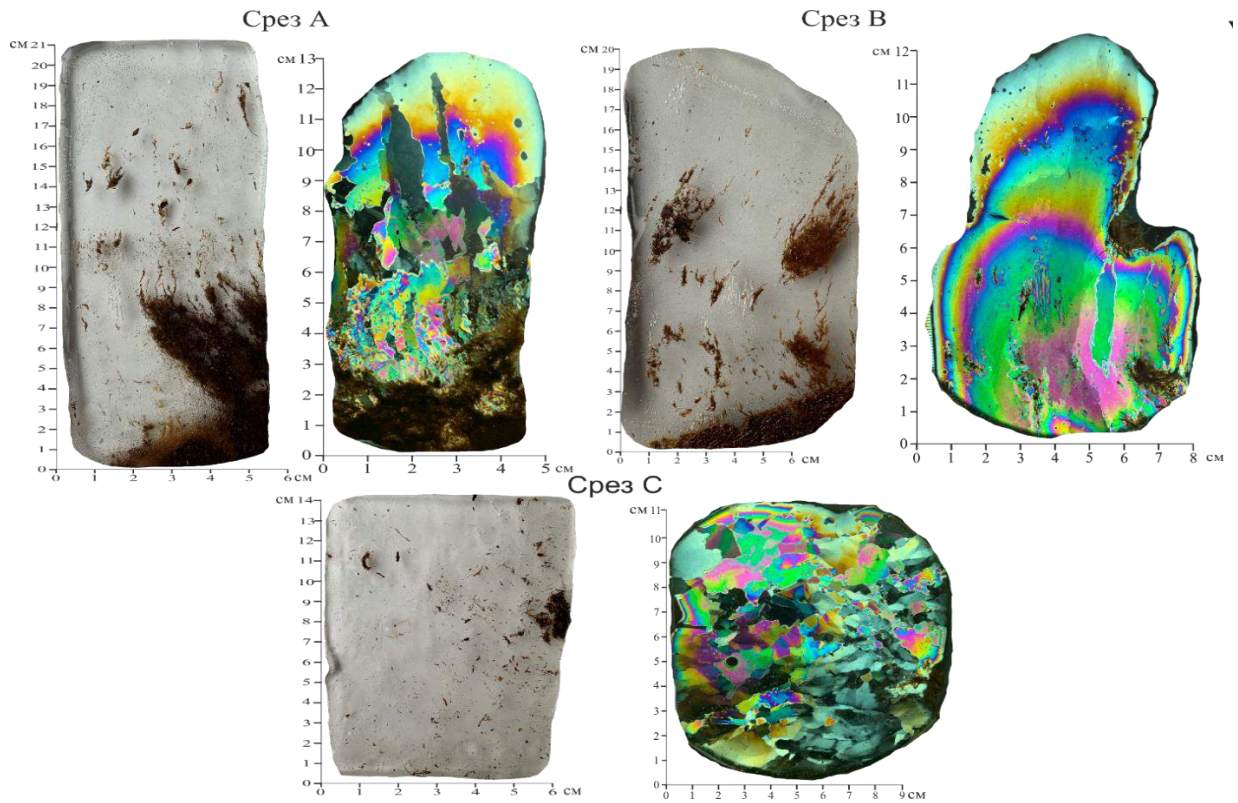


Рис. 30. Термокарстово-полостной лед

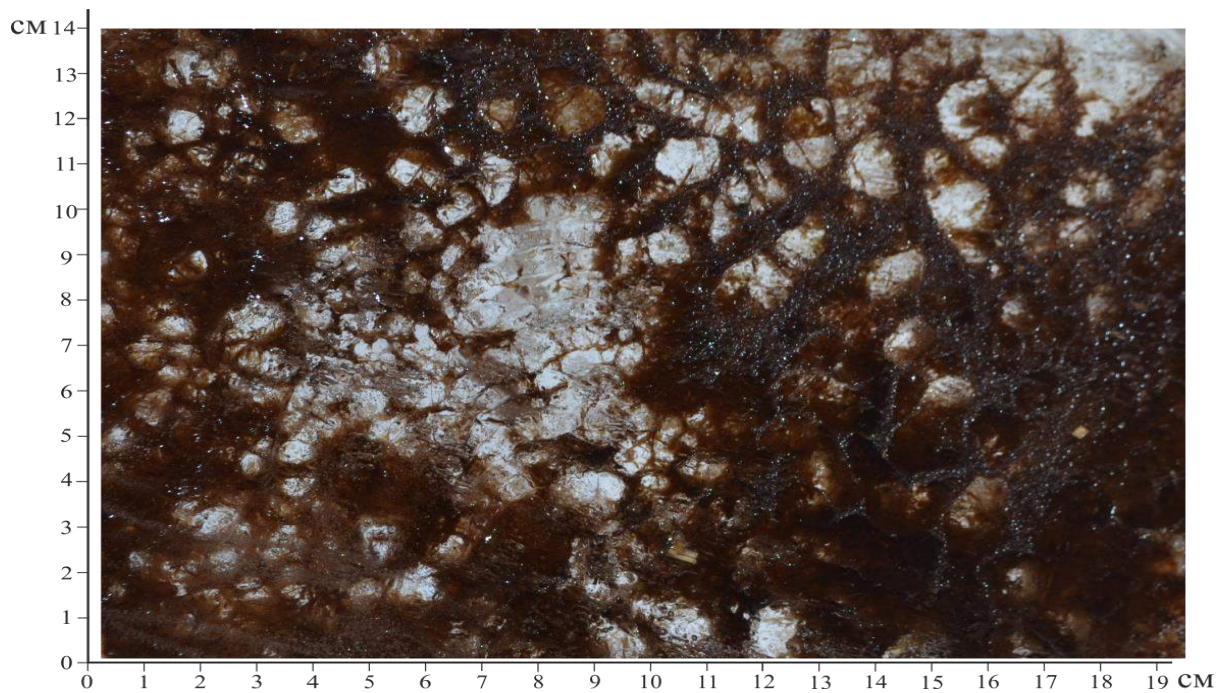


Рис. 31. Соотношение идиоморфных кристаллов льда и торфа в горизонтальном срезе 3 слоя в разрезе В8-18



Крупные, призматические, удлиненные по отношению к поверхности и ориентированные по направлению к фронту промерзания кристаллы, формировались за счет медленного промерзания свободной воды в топи с плавающим мхом в затопленном межполигональном понижении. Термокарстово-полостной лед приурочен и замещает часть льда в плечиках или кровле ПЖЛ и его образование является следствием протаивания синкриогенного торфа.

**Инфильтрационно-сегрегационные шлиры льда** в полигонах в разрезе торфа В8-19 изучены в образце с глубины 0,58-0,61 м (рис. 32).

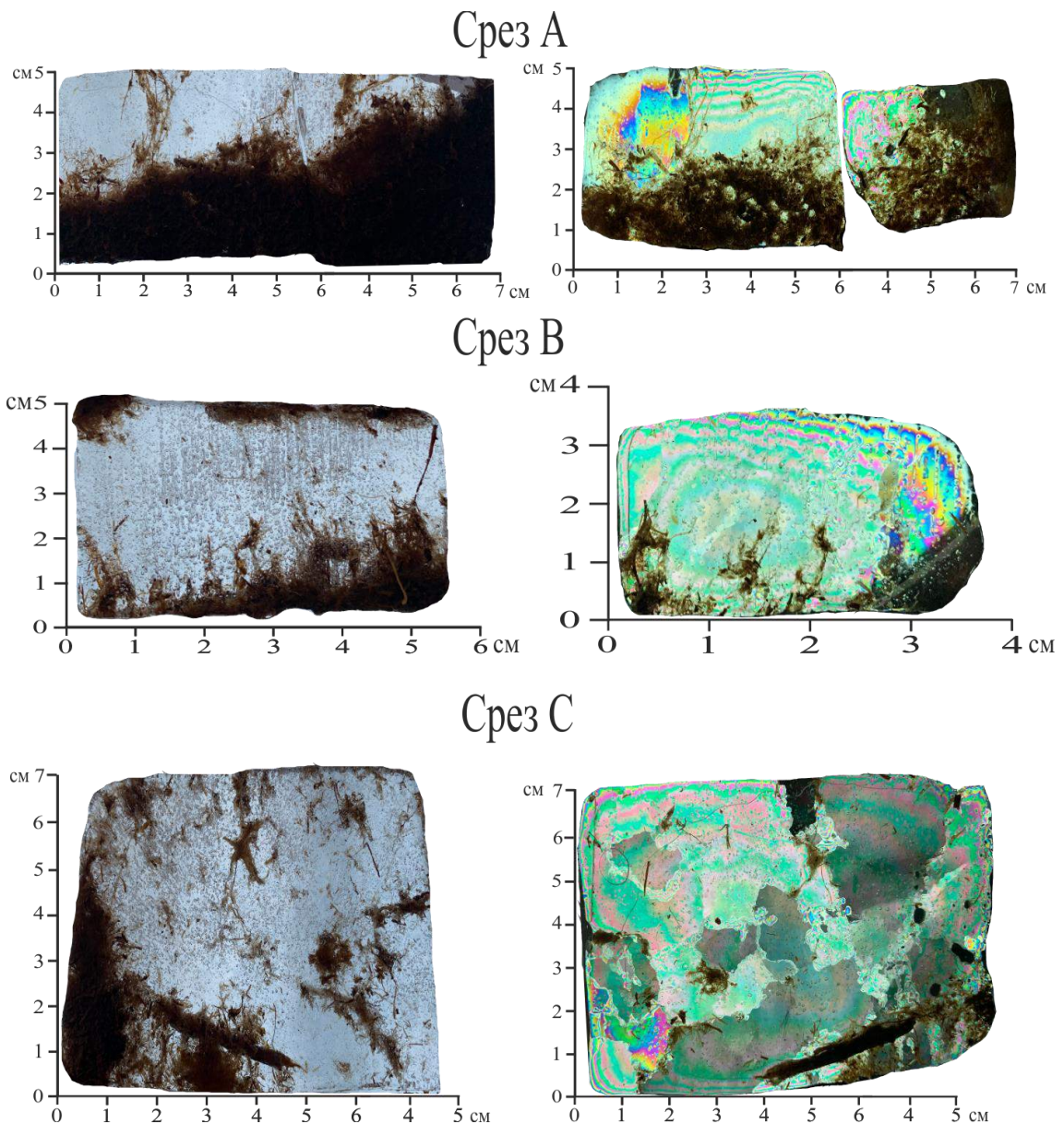


Рис. 32. Шлир инфильтрационно-сегрегационного льда разреза В8-19

Во льду присутствуют рассеянные измельченные частички торфа, целые стебли мха, веточки и многочисленные мелкие пузыри газа, сгруппированные в вертикально вытянутые цепочки.

Источник газа во льду - торф, распределение пузырьков газа, вероятно, свидетельствует о его движении снизу вверх при росте кристаллов. Включения мелких растительных остатков зажаты между кристаллами льда и образуют сложную мозаичную текстуру. В поляризационном свете лед представлен крупными кристаллами льда 2-3 см и более 5 см по срезам А, В, удлинёнными по вертикали (рис. 32).

В срезе С - горизонтальной плоскости шпиря кристаллы с извилистыми неровными контурами, крупные  $\geq 3$  см. В торфе в поляризационном свете видны мелкие кристаллы льда-цемента размером 0,1-0,3 см (рис. 32, А).

**Сегрегационные шпиря льда** (рис. 33) расположены в расчистке В8ж2-20 в криотурбированном торфе слоя 3, залегают параллельно дневной поверхности в пределах полигонов на глубине 0,5-0,8 м и 1,2-1,4 м, а в межполигональных понижениях прилегают к ростку и плечикам ПЖЛ.

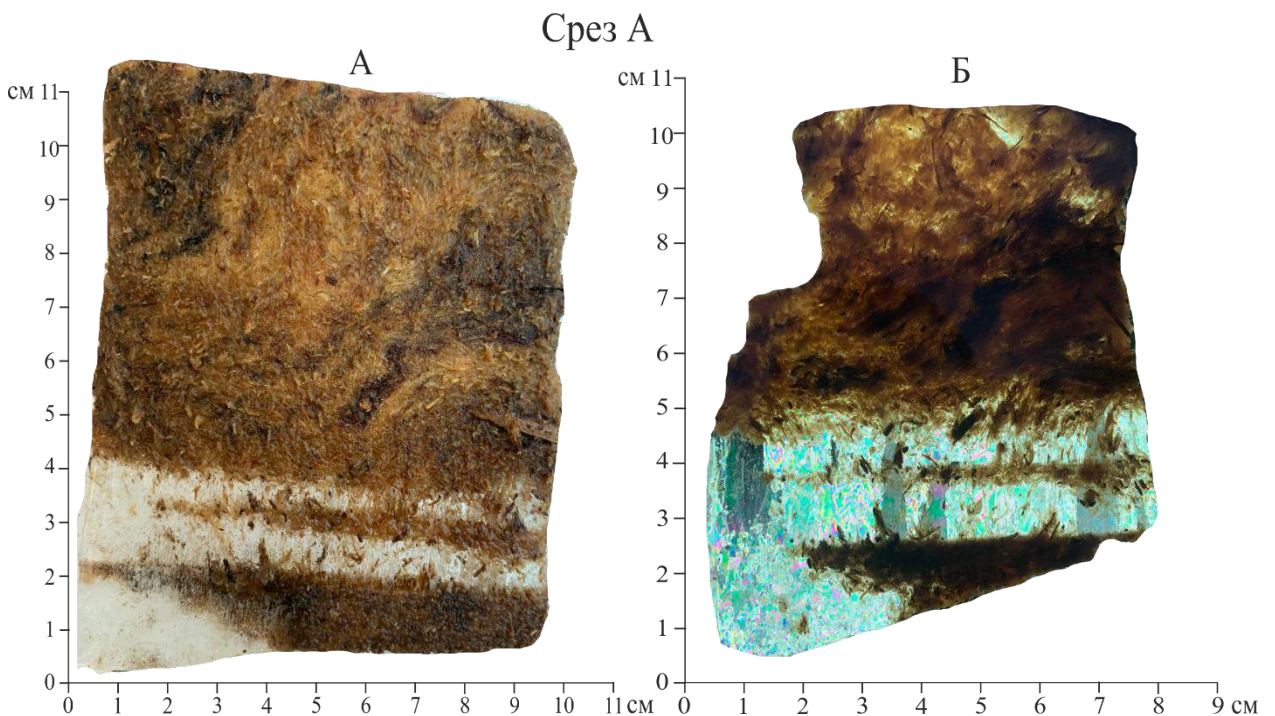


Рис. 33. Сегрегационные шпиря льда в торфе - в проходящем свете (А) в поляризованном свете (Б)

Верхний шпир сегрегационного льда имеет вертикальным размер до 2 см, разделен в середине прослоем торфа (рис. 33). Окружающий рыже-коричневый торф имеет массивную криогенную текстуру, в шлифе в поляризованном свете видны кристаллы льда-цемента.

Присутствие шпиров, образующих пояски льда в торфе полигонов между ПЖЛ является показателем сначала протаивания, снижения кровли ММП, а позднее промерзания, поднятия кровли ММП и накопления синкриогенного торфа.

Проведенные исследования показывают, что в строении полигонального торфяника присутствуют разные генетические типы льдов: полигонально-жильные, термокарстово-полостные, инфильтрационно-сегрегационные и сегрегационные шпир льда. Полигонально-жильный лед образуется в результате процесса морозобойного растрескивания зимой [Leffingwell, 1915], заполнения и замерзания в морозобойных трещинах преимущественно талой снеговой водой весной [Lachenbruch, 1962]. Термокарстово-полостной лед имеет крупные размеры кристаллов, которые зависят от размера полости, количества и скорости промерзания свободной воды в осенне-зимний период [Тихонравова и др., 2017], т.е. в период наиболее высоких отрицательных температур вмещающего мерзлого торфа. Кроме того, протаивание ММП может происходить и в результате обводнения поверхности [Тихонравова и др., 2020]. Шпир льда, залегающие в верхней части торфа, выполнены сегрегационным и инфильтрационно-сегрегационным льдом, их образование обусловлено понижением кровли ММП, вероятно, связанным с изменением температур воздуха.

Криогенное строение полигонального торфяника связано с чередованием природно-климатических условий [Королева и др., 2020а]: 1 - оптимальных для морозобойного растрескивания, 2 - вызывавших процессы локального протаивания и вторичного промерзания с образованием псевдоморфоз в теле ПЖЛ и 3 - периодического понижения кровли ММП на всей площади торфяников сопровождавшимся уменьшением ширины,

образованием плечиков ПЖЛ и сегрегационных шлиров под полигонами в голоцене и при современном потеплении.

Инфильтрация свободной воды в рыхлом неразложившемся влагоемком торфе в понижения верхней границы мерзлых пород, участие слабосвязанной воды органических остатков при сегрегационном и инфильтрационно-сегрегационном льдовыделении приводят к изменению свойств торфяника. При образовании шлиров за счет сегрегации происходит обезвоживание, выход газовых пузырьков из верхней части рыхлого мха и уплотнение торфа в нижней части, образование сильнольдистых зон на контакте торфа со шлиром (рис. 34), поэтому шлир на контакте разных слоев торфа маркирует границу оттаивания.

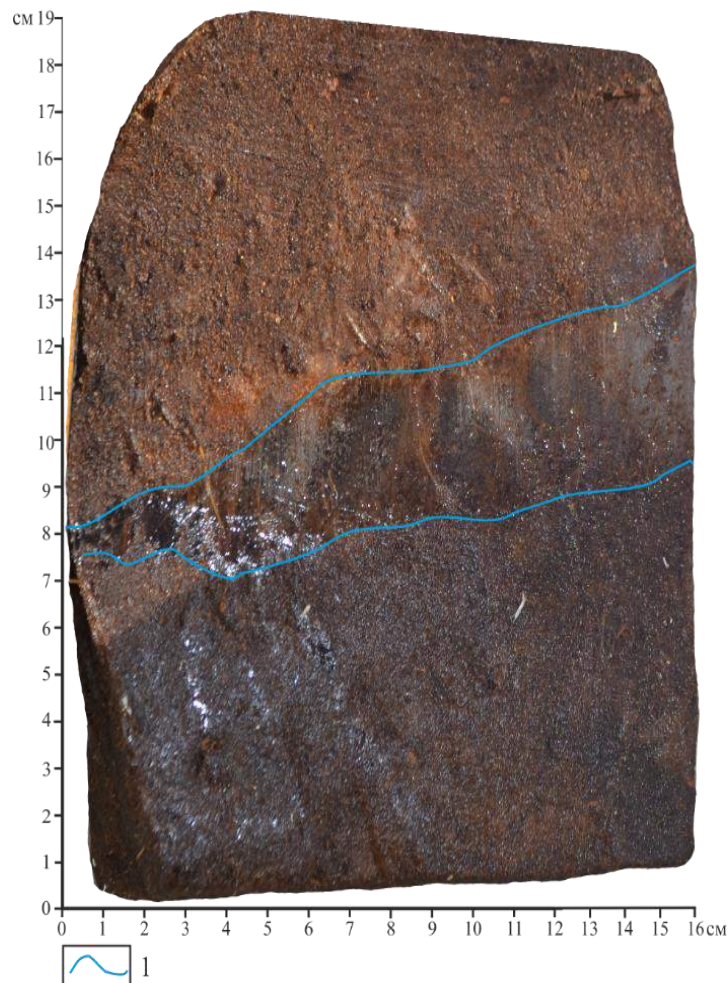


Рис. 34. Шлир на контакте темно-оранжевого рыхлого и темно-коричневого плотного торфа маркирующий границу оттаивания. Условные обозначения: 1 - граница шлира льда

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

Данные о свойствах и строении торфа, изменении глубины протаивания, полученные за 5 лет, позволили выделить в разрезах торфяников В8 и В12 элементы, соответствующие переходному и промежуточному слоям.

### Переходный слой

Одним из критериев выделения переходного слоя могут быть результаты мониторинга не менее чем за последние 5 лет (параграф, 2.1.; рис. 8). 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 (рис. 8). В 2020 г вследствие теплого и раннего лета слой, в основном, полностью протаял. В межполигональных понижениях переходный слой плохо выделяется визуальными и аналитическими методами. В разрезе полигона переходный слой выделяется только в мерзлом керне по желтовато-коричневому цвету торфа (рис. 35), приобретенному в предшествующие этапы протаивания за счет процессов окисления. В стенках полигонов переходный слой частично или полностью протаял и также плохо выделяется аналитическими и визуальными методами. Большая глубина протаивания вблизи термоэрозионных промоин обусловлена лучшим прогревом стенок полигонов, по сравнению с их центрами (рис. 22, 28).

Частичное протаивание современного переходного слоя, вызванное потеплением, проявляется в просадке отложений в межполигональных понижениях и в развитии пучения на валиках полигонов. Положение переходного слоя по глубине залегания не является постоянным за достаточно большой промежуток времени, зависит с одной стороны от глубины СТС и климатических условий, с другой - от пучения и просадок поверхности. Вытаивание переходного слоя при сохранении тенденции

современного потепления может привести к вытаиванию нижележащего промежуточного слоя.

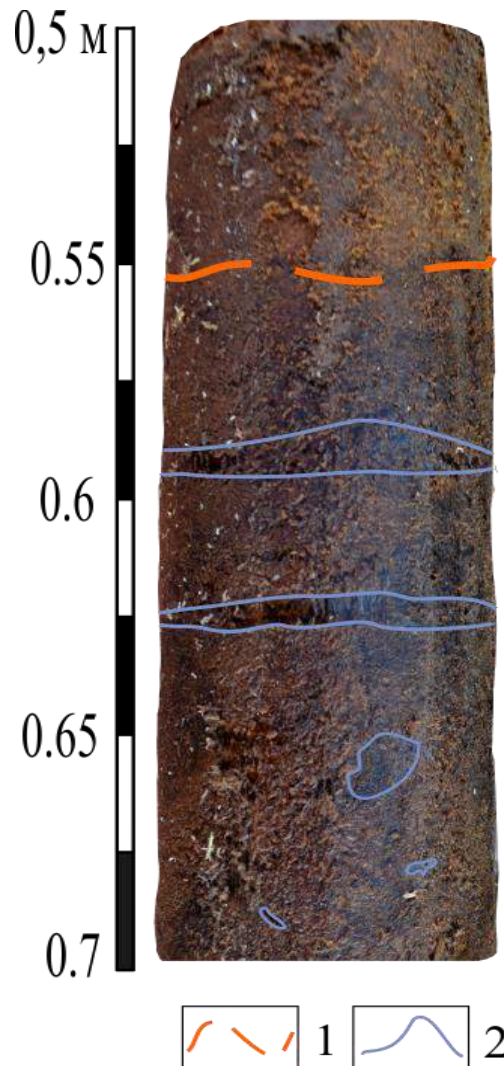


Рис. 35. Фрагмент мерзлого керна скважины на ключевом участке 1 с шлирами сегрегационного льда и переходным слоем. Условные обозначения: 1 - граница переходного слоя; 2 - границы льдов (дата бурения: 16-18 сентября 2020 г)

### Промежуточный слой

В разрезах В8-17-20 межполигональных понижений выделено два промежуточных слоя: 1) нижний в интервале глубин от 0,8-1,3 м до 1,5 м (при просадках в жиле В8-19), вложен в более крупные плечи ПЖЛ; 2) верхний - в интервале глубин – 0,55-0,8 м, также вложен в мелкие плечики ПЖЛ, к которым примыкают шлиры льда (рис. 16, 17, 23, 24).

Промежуточные слои межполигональных понижений характеризуются высокой влажностью и льдистостью. Влажность вблизи ПЖЛ может достигать 5430%, а плотность 1 г/см<sup>3</sup> (табл. 9; Приложение, табл. 12).

В промежуточном слое сегрегационные льды имеют высокое содержание газа (метана) - 774 ppmV, максимальное его содержание отмечается во вмещающем мерзлом торфе, вблизи крупных шлиров льда, – 10509 ppmV [Тихонравова и др., 2020]. Это связано с активной микробиологической деятельностью и разложением торфа в талом состоянии [Ривкина и др., 2006], затем с заземлением и накоплением газов при сегрегационном льдовыделении как между кристаллами льда, так и в торфе. В Тюменском индустриальном университете для шлиров сегрегационного льда промежуточного слоя этих разрезов торфа были определены высокие содержания (6,7% от объема льда) биогенных - CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> и атмосферных газов [Бутаков, Слагода, Тихонравова, 2021].

Оттаявшие отложения верхнего промежуточного слоя в разрезах полигонов В8п-20 и В12п-20 были выделены в рыхлом торфе в интервалах глубин 0,55-0,75 м (рис. 22; 28), в мерзлом состоянии в скважине в центре полигона в интервале глубин 0,55-0,7 м по наличию шлиров льда толщиной до 0,5-1,5 см (рис. 35).

Нижний промежуточный слой в разрезе В8п-20 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 ключевом участке 1 на глубине 0,85-1,3 м (по наличию шлиров льда до 3 см), по схожему криогенному строению с рядом расположенным разрезом В8-19/3 (резкому уменьшению ширины ПЖЛ над крупным плечиками) (рис. 21) и в разрезе В12п-20 на глубине 1-1,5 м (по наличию шлиров льда до 3 см).

На основе этих данных к признакам промежуточного слоя в торфяниках отнесены [Королева и др., 2021]:

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.

Табл. 9. Свойства торфа переходного и промежуточного слоев в мерзлом состоянии

	Полигон		Межполигональное понижение	
	Влажность, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Влажность, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>
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

2) Наличие сегрегационных, термокарстово-полостных, инфильтрационно-сегрегационных, ростков ПЖЛ [Королева, Слагода, Опокина, 2021б], формирование которых связано с локальным термокарстом и сингенетическим промерзанием, обусловленным колебаниями природных условий в голоцене [Тихонравова и др., 2020].

3) Промежуточный слой в межполигональных понижениях отличается большей льдистостью, размерами включений льда, наличием термокарстово-полостных льдов и криотурбаций, обусловленных неравномерными



просадками. В промежуточном слое полигонов выражены субгоризонтальные шлиры льда, параллельные рельефу кровли мерзлоты, образованные при переходе СТС в мерзлое состояние.

Прочностные характеристики мерзлого торфа варьируют незначительно в среднем от 0,95 до 1 г/см<sup>3</sup>, при этом влажность торфа меняется существенно. Незначительные на первый взгляд изменения в плотности мерзлого торфа связаны с разным содержанием льда и органического материала. Торф переходного слоя имеет небольшую влажность, но при этом высокие значения скелета грунта – 0,12 г/см<sup>3</sup> (рис. 36; табл.10).

Табл. 10. Влажность, плотность и плотность скелета грунта разных типов торфа

Вид торфа	Влажность, д.е.	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Плотность скелета торфа, г/см <sup>3</sup>
торф переходного слоя	7,24	0,96	0,12
торф промежуточного слоя рядом с жилой и шлирами льда	54,3	1	0,02
торф промежуточного слоя в полигоне	13	0,98	0,07
синкриогенный торф из мхов	13	0,96	0,07
синкриогенный торф с веточками кустарников	5,58	0,89	0,13

Торф промежуточного слоя рядом с жилой имеет высокие значения влажности и очень маленькие значения скелета грунта 0,02 г/см<sup>3</sup>. Торф промежуточного слоя в полигонах и синкриогенный торф из мхов имеют примерно одинаковые значения плотности скелета 0,07 г/см<sup>3</sup>, но при этом синкриогенный торф из веточек кустарников имеет высокие значения плотности скелета грунта – 0,13 г/см<sup>3</sup> (рис. 36; табл. 10).

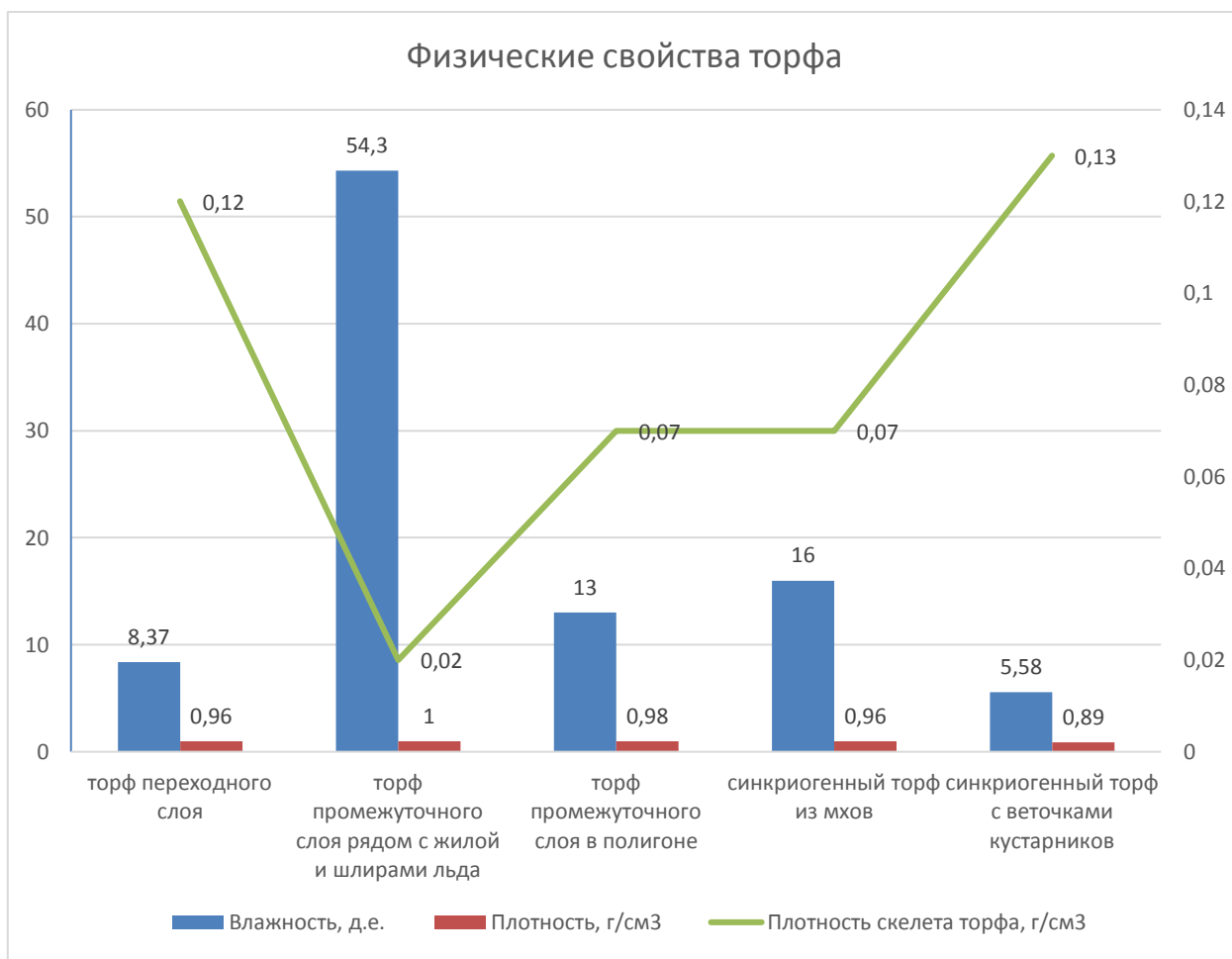


Рис. 36. График распределения физических свойств торфа

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 (рис. 34). В промежуточных слоях уплотнение скелета торфа при сегрегационном льдовыделении происходит за счет миграции влаги к фронту промерзания, увеличения объема льда и выделения газа из нижележащего торфа. В переходном слое уплотнение скелета торфа происходит за счет промерзания-протаивания. Эти процессы формируют вертикальную неоднородность плотности скелета грунта.

Аккумуляция органического материала в торфяниках Пур-Тазовского междуречья происходила в голоцене на фоне сингенетического промерзания отложений. Об этом свидетельствуют поясковые криогенные текстуры (рис. 37, А). Потепление и/или увеличение количества осадков, затопление поверхности полигональных торфяников приводило к уменьшению ширины ледяных жил за счет протаивания кровли сверху или сбоку, просадкам торфа (рис. 37, Б). После возобновления промерзания, морозобойного растрескивания в результате похолодания климата или осушения поверхности на фоне продолжающейся аккумуляции торфа формируются ростки ПЖЛ, т.е. продолжается рост ПЖЛ над плечиками. В торфе полигонов при повышении кровли ММП образуется промежуточный слой. Он представлен сегрегационными льдами, в основном, образующими линзовидную, слоистую криогенные текстуры, причем, шлиры льда часто маркируют нижнюю границу реликтового СТС. В межполигональных понижениях промежуточный слой представлен перемешанным, просевшим рыхлым окисленным и плотным коричневым торфом с ростками ПЖЛ, включениями термокарстово-полостного и линзами инфильтрационно-сегрегационного льда в плечиках ПЖЛ. Под валиками на краях полигонов выделены наиболее крупные включения термокарстово-полостного и инфильтрационно-сегрегационного льдов вместе с сегрегационными шлирами. Это связано с поэтапным промерзанием в полузамкнутой и замкнутой системах в переходной зоне между полигоном и межполигональным понижением, увеличение объемов льда способствует пучению и образованию валиков (рис. 37, В). Обводненность территории и/или изменения климата за период голоцена, вероятно, изменялись несколько раз (рис. 37, Г), поэтому в разрезах полигональных торфяников Пур-Тазовского междуречья выделено несколько переходных слоев (рис.37, Д).

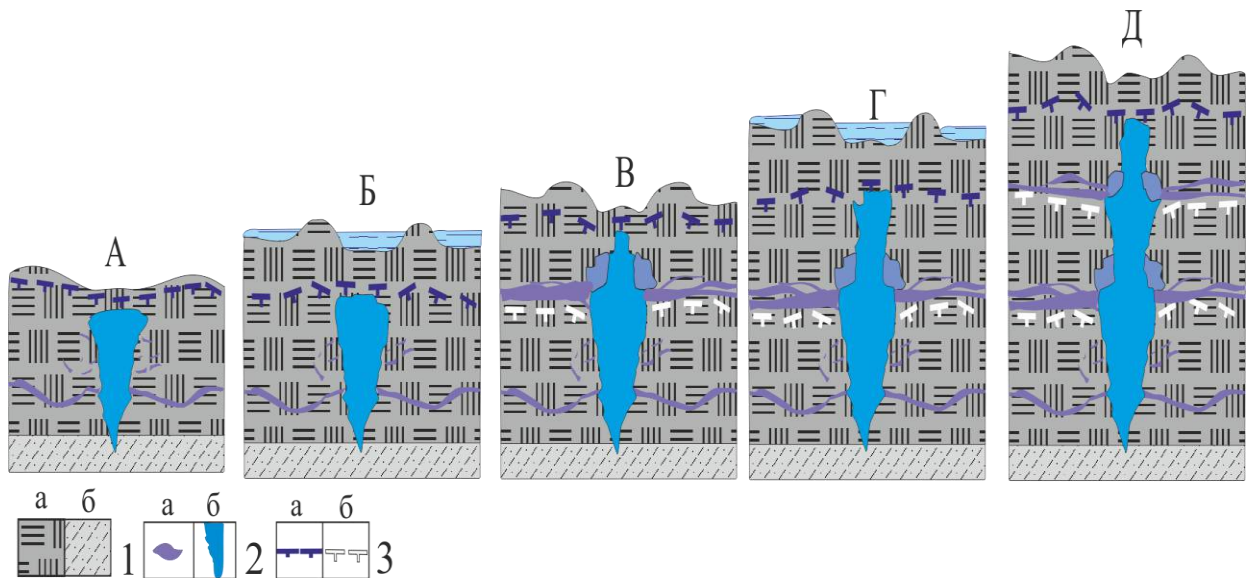


Рис. 37. Схема формирования промежуточного слоя. Условные обозначения: 1а - синкриогенный торф, 1б - подстилающие озерно-болотные отложения; 2а - термокарстово-полостные, сегрегационные и инфильтрационно-сегрегационные льды; 3а - граница СТС, 3б - реликтовая граница СТС

Согласно данным И.И. Борзенковой, В.А. Зубакова [1989], во внеледниковых районах Северного полушария значительные потепления соответствовали раннему бореальному периоду (9,0–8,6 т.л.н.), раннему и позднему атлантическому периодам (7,9–7,5 и 6,2–5,3 т.л.н.). По данным разрезов ключевого участка № 1 возраст изученной 2-х метровой части торфа полигононов и межполигональных понижениях в целом совпадает, но в понижениях радиоуглеродные датировки торфа нарушены вследствие пучения, просадок и перемешивания торфа при формировании криотурбаций, а также весь разрез торфа смещен вниз (рис. 16, 22). Протаивание синкриогенного торфа, возможно, произошло ~ 6,2-5,3 т.л.н, а дальнейшее промерзание и образование нижнего промежуточного слоя в суббореальный период, возможно, 4,87-3,84 т.л.н. в наиболее холодные фазы [Архипов, Волкова, 1994].

В разрезе полигона (рис. 22) с ненарушенной последовательностью датировок, протаивание отложений и углубление СТС могли происходить в потепление суббореального термического оптимума на рубеже 3,5 т.л.н. и начала субатлантического периодов. Верхний промежуточный слой с

ростками ПЖЛ, возможно, образовался в периоды похолодания субатлантического периода около 1,4-1,2 т.л.н. [Архипов, Волкова, 1994]. Циклическое промерзание-протаивание в СТС привело к сильному уплотнению верхних слоев торфа, перемешиванию, криотурбациям, которое началось в субатлантический период и продолжается до настоящего времени.

**Выводы по главе 2:** вытаивание переходного слоя при сохранении тенденции современного потепления может привести к вытаиванию льдистого промежуточного слоя и утрате буферной роли для ММП. Проведенные исследования позволили установить свойства и признаки буферной зоны - переходного и промежуточных слоев.

В результате исследований установлено следующее:

- 1) 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. Переходный слой чаще подстилается льдистыми отложениями промежуточного слоя, но его не всегда можно выделить по последовательности залегания.
- 2) Промежуточные слои в торфяниках характеризуются следующими признаками: линзовидными и слоистыми криогенными текстурами, льдистостью, включениями льдов: сегрегационных, термокарстово-полостных, инфильтрационно-сегрегационных и ростками ПЖЛ, повышенным содержанием газа в сегрегационных льдах и торфе. Также 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 шпирьы льда,

параллельные рельефу кровли мерзлоты, образованные при переходе СТС в мерзлое состояние.

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 шпиров, увеличения объема льда, миграции влаги к фронту промерзания и диффузии газа из нижележащего торфа вследствие многократных циклов промерзания-протаивания.

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

### **ГЛАВА 3. ОРГАНИЧЕСКИЕ ПЯТНА-МЕДАЛЬОНЫ – ЭЛЕМЕНТ СТРОЕНИЯ ПОЛИГОНАЛЬНЫХ ТОРФЯНИКОВ ПУР-ТАЗОВСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

#### **3.1. Морфология и распространение органических пятен-медальонов**

На III озерно-аллювиальной равнине Пур-Тазовского междуречья, как было показано в главе 1, широко распространены не только минеральные, но и органические пятна-медальоны, приуроченные, в основном, к мощным торфяникам в хасырях. Как показали наблюдения 2016 года массовое образование органических пятен-медальонов произошло именно в летний период, не только в южной тундре и на севере лесотудры Пур-Тазовского междуречья, но и на севере Гыданского полуострова. Для выяснения причин активизации процесса пятнообразования в 2016-21 гг были проведены детальные исследования строения и свойств торфа органических пятен-медальонов (рис. 38) и полигональных торфяников в СТС.

Все изученные в торфяниках органические пятна-медальоны (рис. 38) формировались в пределах СТС, глубина которого за период наблюдений неравномерно менялась от 0,49 до 0,59 м (рис. 8). При увеличении мощности СТС в его строении участвуют оттаявшие: переходный и частично промежуточный слои (см. глава 2, раздел 2.4), а также верх синкриогенного торфа (слой 1), что характерно, в основном, для ключевого участка 2, расположенного в лесотундре.

Органические пятна-медальоны распространены на выпуклых, плоских, вогнутых полигонах с валиками, редко на плоских межполигональных понижениях и в широких заросших колеях вездеходов. Они обрамлены кочками и бугорками с растительностью, формируются в понижениях поверхности, поэтому сходны с минеральными пятнами-медальонами. Торф на поверхности пятен-медальонов по своим свойствам схож с супесями или суглинками: мелкодисперсен и вязко-пластичен (рис.38).

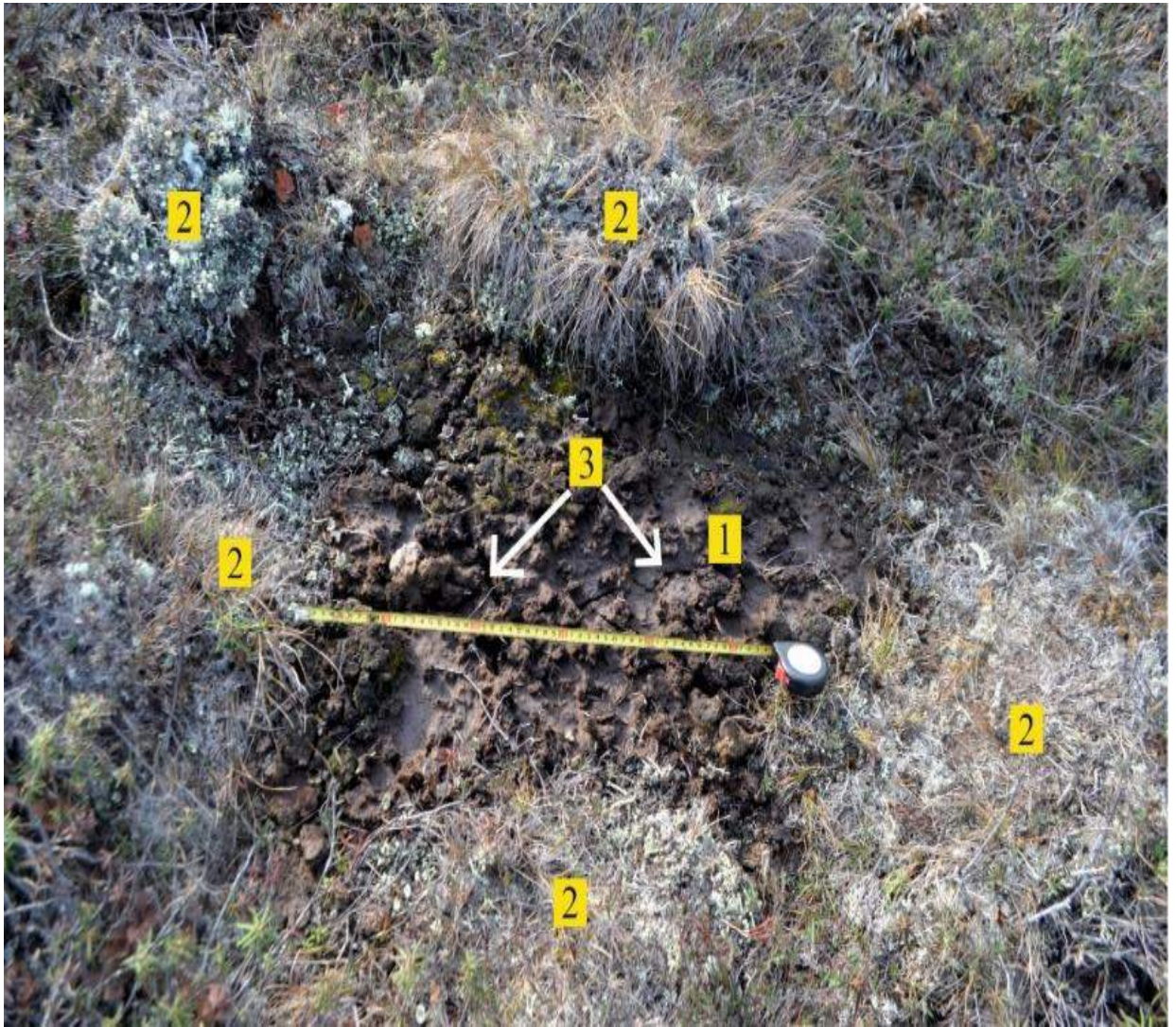


Рис.38. Органическое пятно-медальон. Условные обозначения: 1 – органическое пятматериал, 2 - кочки, 3 - трещины усыхания

Органические пятна-медальоны, приуроченные к перегибам поверхности между валиками полигонов и межполигональными канавами, ориентированы в сторону понижения, что еще раз указывает на разжиженное состояние свежей излившейся массы (рис.39).

При повторных излияниях в пределах полигональных ванн торфяников органические пятна-медальоны сливаются и размываются, что способствует осушению заболоченных участков и образованию уплотненной ровной коричневой поверхности без растительности с отдельными редкими кочками (рис. 40).



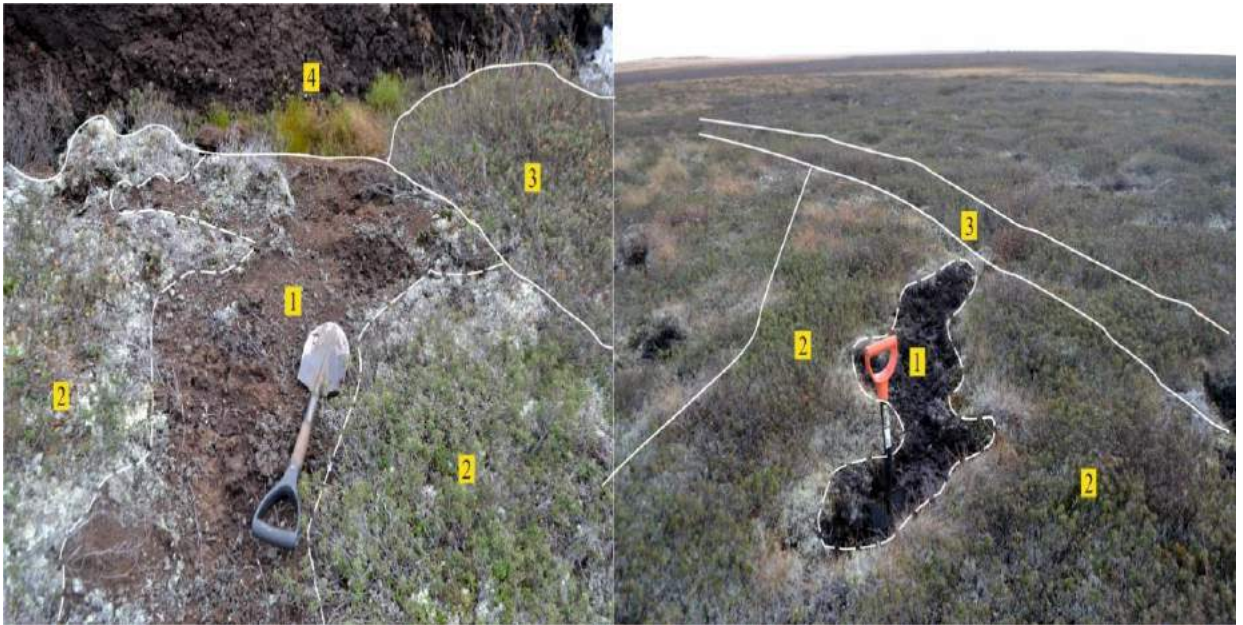


Рис.39. Органические пятна-медальоны «стекающие» в межполигональные понижения. Условные обозначения: 1 – слившиеся органические пятна-медальоны; 2 – валик полигона; 3 - межполигональное понижение; 4 - термоэрозивная промоина



Рис. 40. Уплотненная ровная поверхность, образованная при слиянии органических пятен-медальонов. Фото Слагоды Е.А.

Обширные слившиеся пятна в полигональных ваннах приурочены, в основном, к сниженным ложбинам стока хасыреев в лесотундре (ключевой участок 2) и к техногенно-нарушенному подтопленному хасырею, пекрытому дамбой (ключевой участок 4). Процессы неравномерного протаивания на этих участках были вызваны обводнением поверхности, более частым, чем на дренированных полигональных торфяниках, что привело к образованию большего количества, слиянию и размыву органических пятен-медалонов.

Органические пятна-медальоны имеют в плане разнообразные формы в зависимости от расположения по отношению к полигональному рельефу (рис. 41):

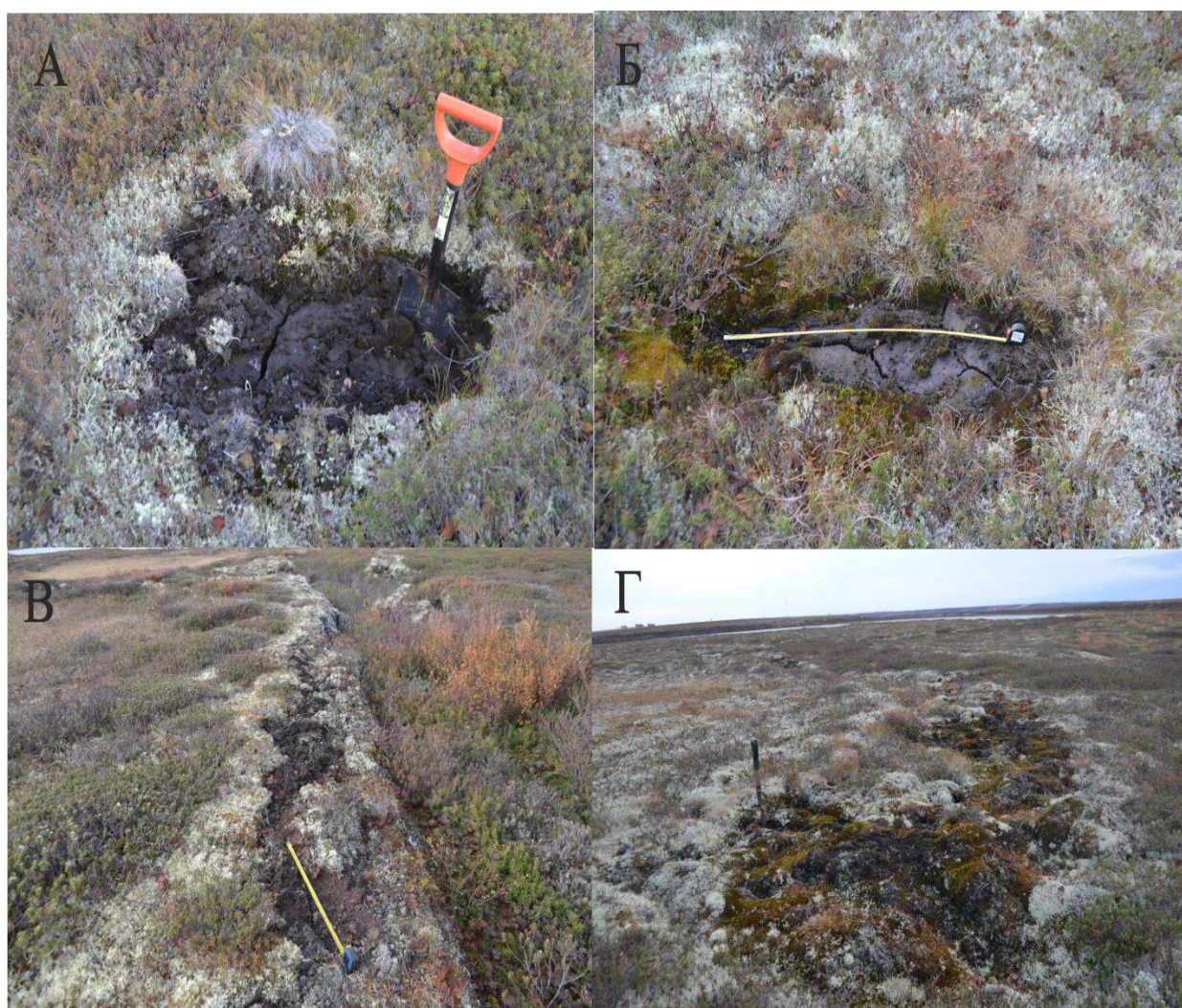


Рис. 41. Органические пятна-медальоны: А - округлые; Б - вытянутые; В - линейные; Г - слившиеся

- 1) Округлые пятна-медальоны расположены на полигонах в понижениях между кочками. Их диаметр от 0,2 до 0,5-0,7 м (рис. 41, А).
- 2) Вытянутые пятна-медальоны также образуются в понижениях между кочками, их вытянутые формы связаны с растеканием пятен по уклону поверхности. Длина медальонов 0,4-0,8 м, ширина 0,1-0,3 м (рис. 41, Б).
- 3) Линейные пятна-медальоны образуют слившиеся в цепочки пятна-медальоны в пределах линейных элементов микрорельефа (валиков полигонов), чаще их размеры составляют: длина от 0,5 до 1,5 м, ширина 0,1-0,2 м (рис. 41, В).
- 4) Слившиеся пятна-медальоны - это пятна, которые соединились в единый массив в результате повторных излияний за несколько лет и размыва поверхности временными водотоками, талыми снеговыми или дождевыми водами. Размеры слившихся пятен могут составлять от нескольких до десятков метров (рис. 40; 41, Г).

Определены основные признаки органической массы пятен-медальонов. Свежие (излившиеся в год наблюдений) пятна-медальоны влажные, имеют черный или черно-коричневый цвет, не имеют следов размыва и не заселены растениями-первопоселенцами (рис. 38; 41, А, Б). Пятна-медальоны, которые излились несколько сезонов назад, частично и полностью заросли лишайниками, мхами, грибами и другими растениями. Их поверхность сглажена, размыва дождем и талыми снеговыми водами, приобрела светло-коричневый и оранжевый, охристый цвет, т.е. органическая масса была окислена (рис. 40)

В 2019-20 гг образование новых, но более мелких пятен-медальонов (диаметром 10-15 см) (рис. 42, А), происходило при повторных излияниях органической массы по старым пятнам-медальонам. При этом частично заросшая поверхность старого пятна-медальона была приподнята, частично разорвана, поверхность нового пятна-медальона окружена раздвинутыми в стороны фрагментами растительного покрова старого пятна, а свежая органическая масса разбита трещинами усыхания (рис. 42, Б).



Рис. 42. Органические пятна-медальоны небольшого размера (А); пятнообразование по пятну-медальону (Б)

В период наблюдений за более ранними пятнами-медальонами при сохранении максимальных глубин СТС отмечены изменения формы пятен-медальонов и уменьшение их площади при повторных излияниях органической массы, что, по-видимому, связано со снижением интенсивности пятнообразования в торфяниках.

### 3.2. Строение и свойства органических пятен-медальонов в разрезах

Торфяник с многочисленными пятнами-медальонами впервые был изучен на юге района исследований, в современной лесотундре, в хасырее с мохово-лишайниковым и кустарничковым покровом, с обширными ложбинами стока и частично заросшем кустарником.

В пределах полигона на ключевом участке 2, шурфом В12-16 глубиной 0,7 м, заложенном между кочками, было вскрыто органическое пятно-медальон, которое имеет характерное строение для большинства подобных образований (рис. 43).



Рис. 43. Органическое пятно-медальон на ключевом участке 2

Отложения, вскрытые шурфом, имели резкий и сильный застойный гнилостный запах. В разрезе снизу вверх выделены слои торфа (рис. 44):

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 многолетнемерзлых пород имеет вогнуто-чашеобразную форму, ее снижение между кочками достигает 10 см.

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 неразложенными мхами, кустарничками и внедрениями инъекций черного торфа из слоя 1.

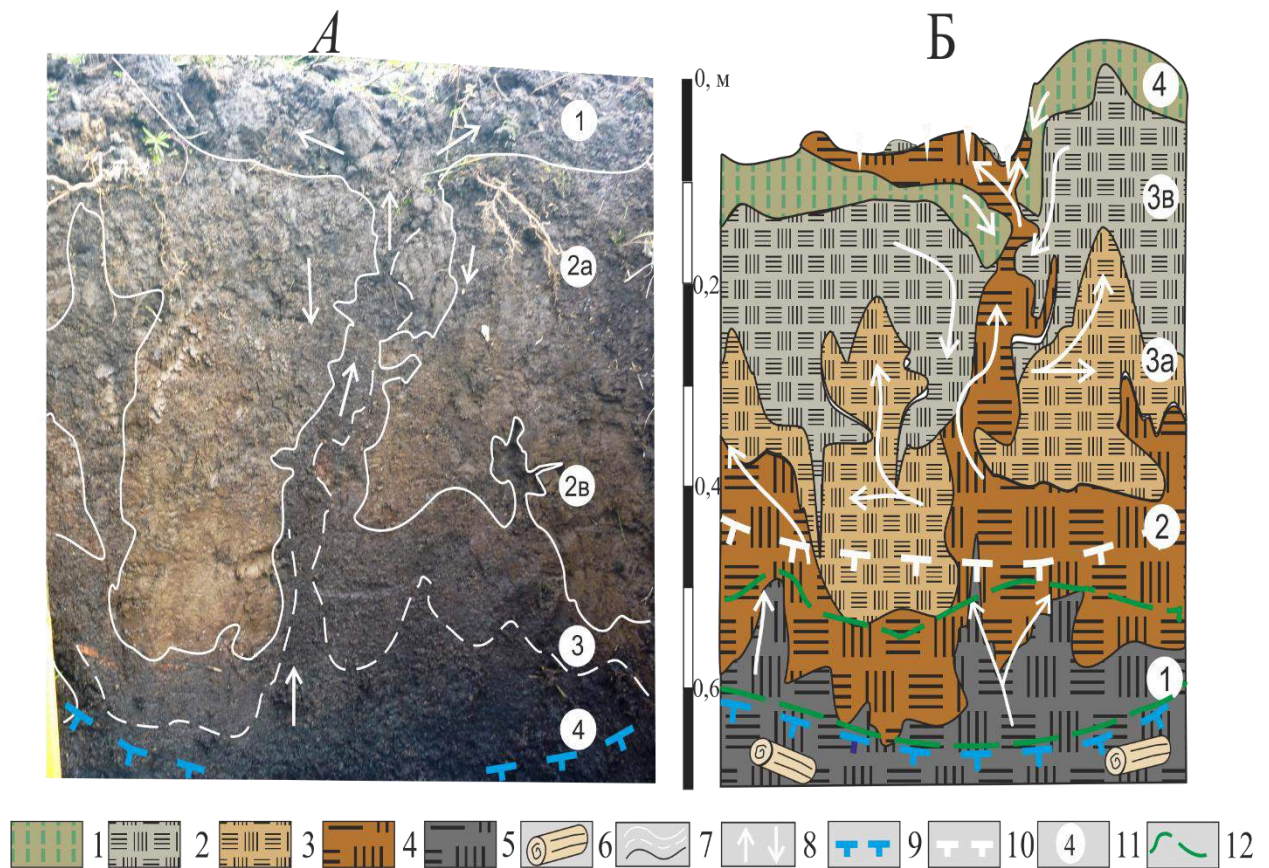


Рис. 44. Разрез В12-16 пятна-медальона на фотографии (А), схема строения торфа в СТС и направления перемещения органического материала (Б) 1-5 - слои торфа (см. описание в тексте); 6 - древесные остатки; 7 - границы слоев; 8 – современная граница ММП; 9 - реликтовая граница ММП; 10 - направление инъекции и перемещения органического материала; 11 - номер слоя; 12 - оттаявшие отложения переходного и промежуточного слоев

Слой 3 [0,07-0,45 м] – торф разложенный, плотный, коричневато-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%, т.е. содержание золы (продуктов спекания) - 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].

Слои всех разновидностей разложенного и рыхлого торфа разорваны инъекцией неразложенного и слаборазложенного торфа слоев 1, 2.

Направление выброса на поверхность в разрезе пятна-медальна четко прослеживается по контрасту цвета отложений (рис. 44, Б).

В 2019 г на ключевом участке 2 в пределах полигонов с меньшим покрытием растительностью вскрыт разрез слившихся органических пятен-медальонов. В разрезе отмечено четкое понижение кровли ММП на 0,1 м - чаша оттаивания. На поверхности присутствовали пятна торфа как свежего, так и с растениями-первопоселенцами, разделенные отдельными кочками с остатками мхов, и выброшенными, иногда перевернутыми комками растений с корнями. В разрезе отчетливо выделяются 3 инъекции торфа слоев 2 и 1, которые разрывают слой 3 (рис. 45).

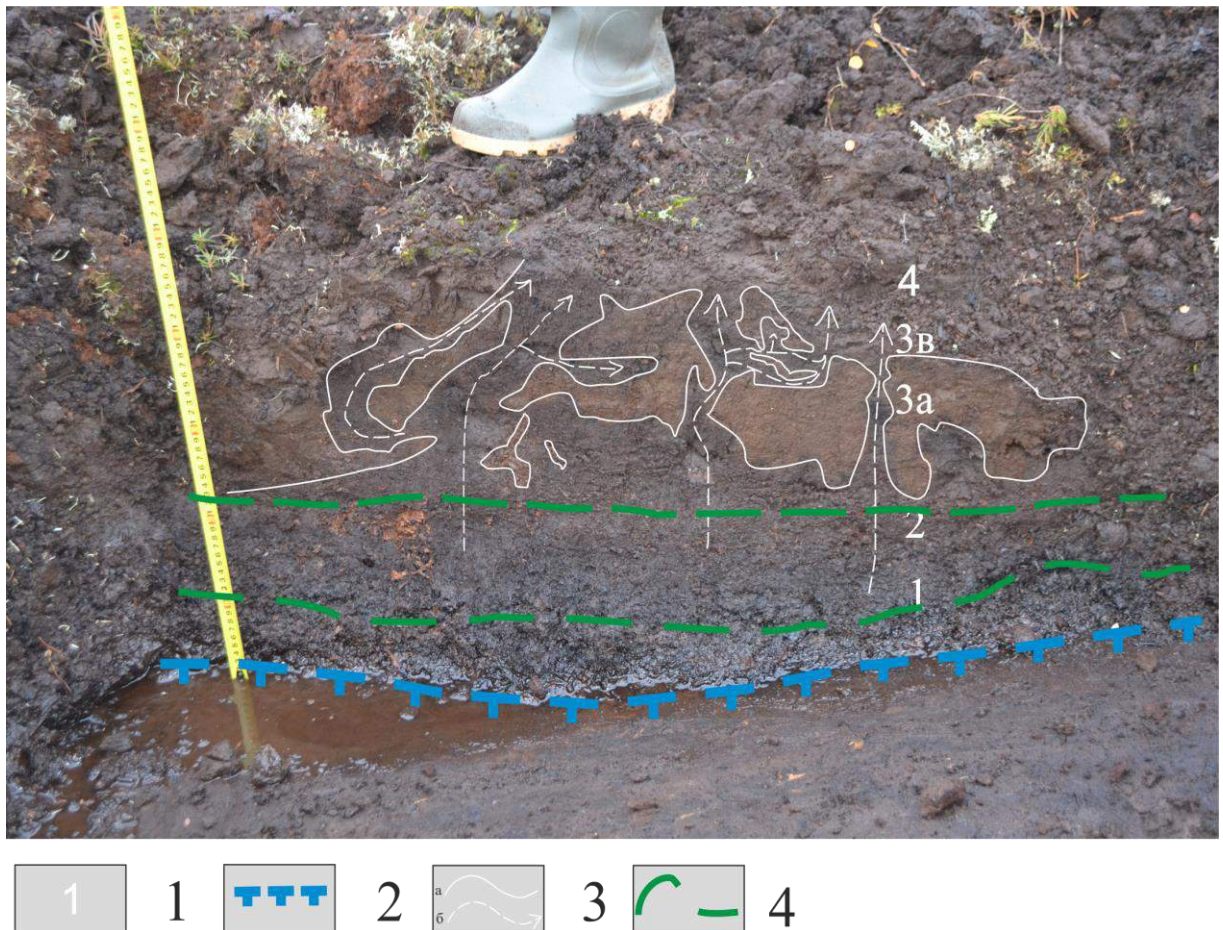


Рис. 45. Разрез органических пятен-медальонов над чашей оттаивания в кровле многолетнемерзлого торфа. 1 - номер слоя, 2 - граница ММП контуры пятен-медальонов, 2 - контуры инъекций слоев 1, 2 в разрезе; 3 - направление движения органической массы; 4 - оттаявшие отложения переходного и промежуточного слоев

Этот разрез подтверждает, что несколько инъекций в одном и том же месте, излившиеся на поверхность в разные годы, приводят к слиянию пятен-медальонов и увеличению их размера. Протаивание переходного слоя, частичное протаивание промежуточного слоя и синкриогенного торфа под слившимися пятнами за счет локального снижения кровли ММП привело к последовательному образованию нескольких инъекций.

На ключевом участке 1 в пределах плоского полигона (без полигональной ванны) под органическим пятном-медальоном над чашей оттаивания уплотненный слой 3в также прорван инъекциями, в основном, торфа из переходного и промежуточного слоев, а синкриогенный торф протаял на глубину менее 5 см (рис. 46, А). Более редкие и узкие инъекции органической массы, излившейся на поверхность, возможно, связаны с менее интенсивным или более поздним образованием пятен-медальонов в южной тундре, чем в лесотундре. За пределами пятен-медальонов в полигонах над ровной кровлей ММП слой 3, более криотурбирован, но инъекции торфа из слоя 2 не достигают поверхности. На таких участках распространены кочки с мохово-лишайниковым покрытием (рис. 46, Б).



Рис. 46. Разрез органического пятна-медальона на ключевом участке 1 (А), разрез фонового участка полигона рядом с пятном (Б). Стрелками обозначены направления инъекций.



В 2020 г на этом ключевом участке в аналогичном разрезе органического пятна-медальона в инъекции и вмещающих слоях торфа установлено распределение разных видов растительных остатков. В синкриогенном торфе слоя 1 вид торфа осоково-гипновый с содержанием березки. В слое 2 распространен осоково-сфагново-гипновый торф. Уплотненные слои 3а и 3в представлены сфагновым и осоковым видами торфа соответственно (табл. 11). Инъекция торфа в пятне-медальоне содержит растительные остатки слоя 1 и 2, что указывает на перемещение органической массы снизу вверх и ее излияние на поверхность.

Табл. 11. Ботанический состав органического пятна-медальона на ключевом участке 1 (определение Кузнецовой А.О.)

№ слоя	Глубина, м	Вид торфа
3в	0,2	Осоковый
3а	0,3	Сфагновый
2	0,45	Осоково-сфагново-гипновый торф
1	0,55	Осоково-гипновый торф с содержанием березки
Инъекция	0,3-0,4	Растительные остатки, принадлежащие березке, сфагновым и гипновым мхам

Разрезы органических пятен-медальонов на полигонах ключевых участков 3 (на значительном удалении от инженерных сооружений) и 4 (подтопленном после сооружения дамбы), обладают сходным строением и свойствами: понижением кровли ММП под пятнами, приуроченностью к понижениям микрорельефа, наличием аналогичных слоев торфа. В строении пятна-медальона над углублением в кровле ММП выражено несколько инъекций, выполненных, в основном, торфом слоя 2 (рис. 47, А).

На участке 4 слившиеся пятна-медальоны из разных внедрений (рис. 47, Б) занимают большую площадь полигонов, вероятно, из-за большего подтопления.

На ключевом участке 2 в лесотундре процессы излияния органической массы на поверхность, вероятно, начались раньше в 2008-12-14 гг, в связи с увеличением летних температур в эти годы [Архив погоды в Тазовском..., 2021] и шли интенсивнее по сравнению с ключевыми участками южной тундры 1, 3, 4. Результаты исследований показали, что органические пятна-медальоны являются типичными для торфяников Пур-Тазовского междуречья.

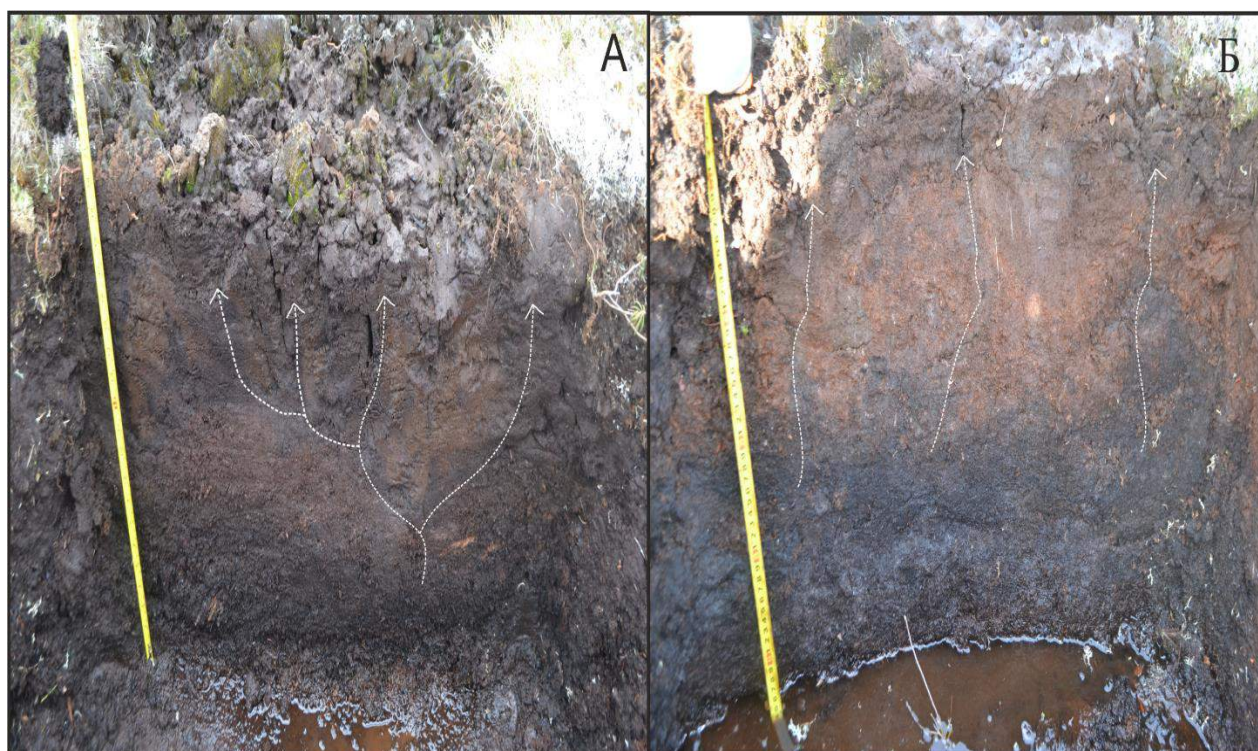


Рис. 47. Разрез органического пятна-медальона на ключевом участке 3 (А), разрез органического пятна-медальона на ключевом участке 4 (Б). Стрелками обозначены направления инъекций.

В разрезах органических пятен-медальонов и во вмещающих фоновых отложениях изучены **физические и механические свойства торфа**: влажность, плотность, угол внутреннего трения, сцепление. Фоном по отношению к пятну-медальону является торф полигона, представленный слоями 1, 2, 3 в СТС. На ключевых участках для каждого выделенного торфяного слоя в пределах пятен-медальонов и фоне посчитаны средние значения естественной влажности и плотности.

На **ключевом участке 3**, ненарушенном антропогенной деятельностью, отмечено увеличение влажности торфа с глубиной, как в органических пятнах-медальонах, так и в фоне (рис. 48).

В торфе пятен-медальонов влажность меньше в слое 3а-3в на 10-23%, в слое 2 на 20% и в слое 1 на 9 %, чем в тех же слоях фонового торфа (рис. 48).

Пониженная влажность торфа пятен-медальонов объясняется излияниями большей части влаги вместе с органической массой на поверхность, а также ее повышенным испарением с поверхности пятен лишенной растительности.

Наиболее плотными являются верхние слои 3а и 3в, что связано с их циклическим промерзанием-протаиванием в увлажненном СТС. Воздействие криогенных процессов привело к более интенсивному измельчению и преобразованию органики, по сравнению с нижележащими слоями, вовлеченными в СТС позднее, скорее всего, в потепление 2000-х годов.

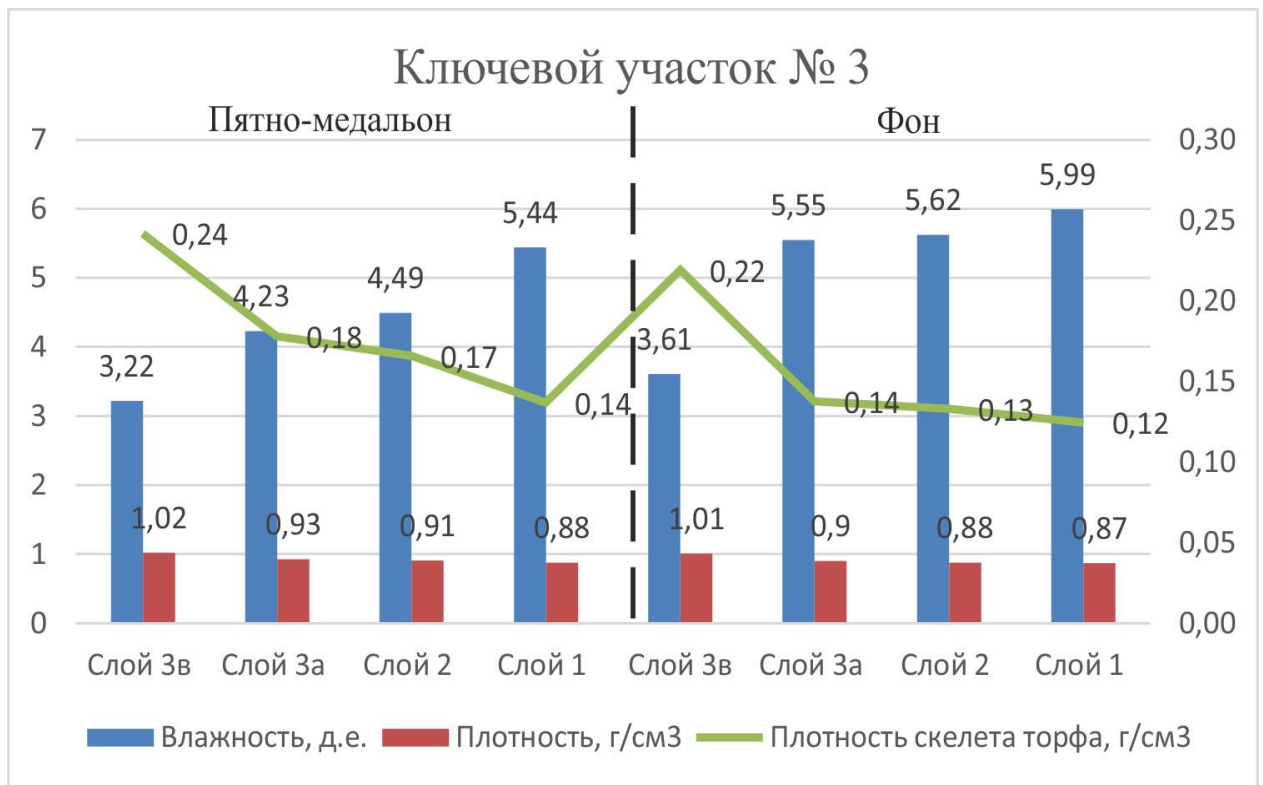


Рис. 48. Распределение плотности и влажности в пятнах-медальонах и в фоне на ключевом участке 3

Колебания величины плотности торфа в талом состоянии в пятне-медальоне и слоях фонового торфа составляют 0,02-0,03 г/см<sup>3</sup> и находятся в пределах погрешности. Существенные различия выявлены в значениях плотности скелета грунта. В разрезе пятна-медальона плотность скелета грунта слоя 3в – 0,24 г/см<sup>3</sup>, в 1,6 раз больше, чем у синкриогенного торфа слоя 1. Плотность скелета грунта слоев 3а и промежуточного слоя 2 практически не различается, что может быть связано с предшествующим этапом протаивания и уплотнением слоя 2. В разрезе фонового торфа наибольшие значения плотности скелета характерны для слоя 3в – 0,22 г/см<sup>3</sup>, и постепенно уменьшаются слоях 3а, 2 и 1, т.е. при несколько меньших значениях плотности скелета сохраняется их распределение как в пятне-медальоне.

Влажность на **ключевом участке 2** в органических пятнах-медальонах в слое 1 и 2 больше в пятне, чем в фоне, что связано с большей глубиной протаивания в пятне и увлажнением за счет скопления влаги в понижении кровли ММП (рис. 49).

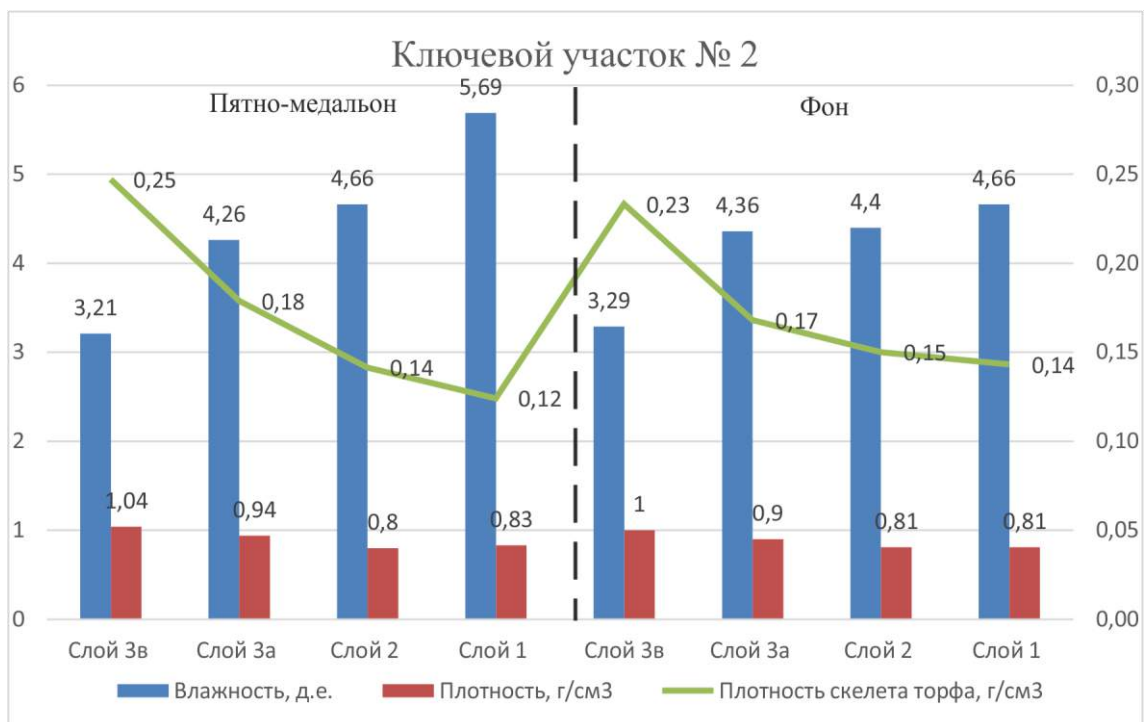


Рис. 49. Распределение плотности и влажности в пятнах-медальонах и в фоне на ключевом участке 2

В приповерхностных слоях влажность торфа составляет 321 – 569% в пятне-медальоне и 329-466% в фоне на полигонах. Плотность торфа в пятне-медальоне немного больше, что связано с криотурбированием и уплотнением торфа рядом с инъекциями. Плотность нижних слоев торфа в пятне-медальоне и в фоне меньше, чем верхних, поскольку торф еще не успел уплотниться при просадке.

В целом для ключевого участка 2 характерно распределение плотностей скелета в пятнах-медальонах и в торфе фона полигонов аналогично вышеописанным на ключевом участке 3.

На **ключевом участке 1**, расположенном в 20 км севернее ключевого участка 2, влажность торфа в пятнах-медальонах значительно выше, по сравнению с другими ключевыми участками (рис. 50), что, возможно, связано с более поздним пятнообразованием в хасырее.

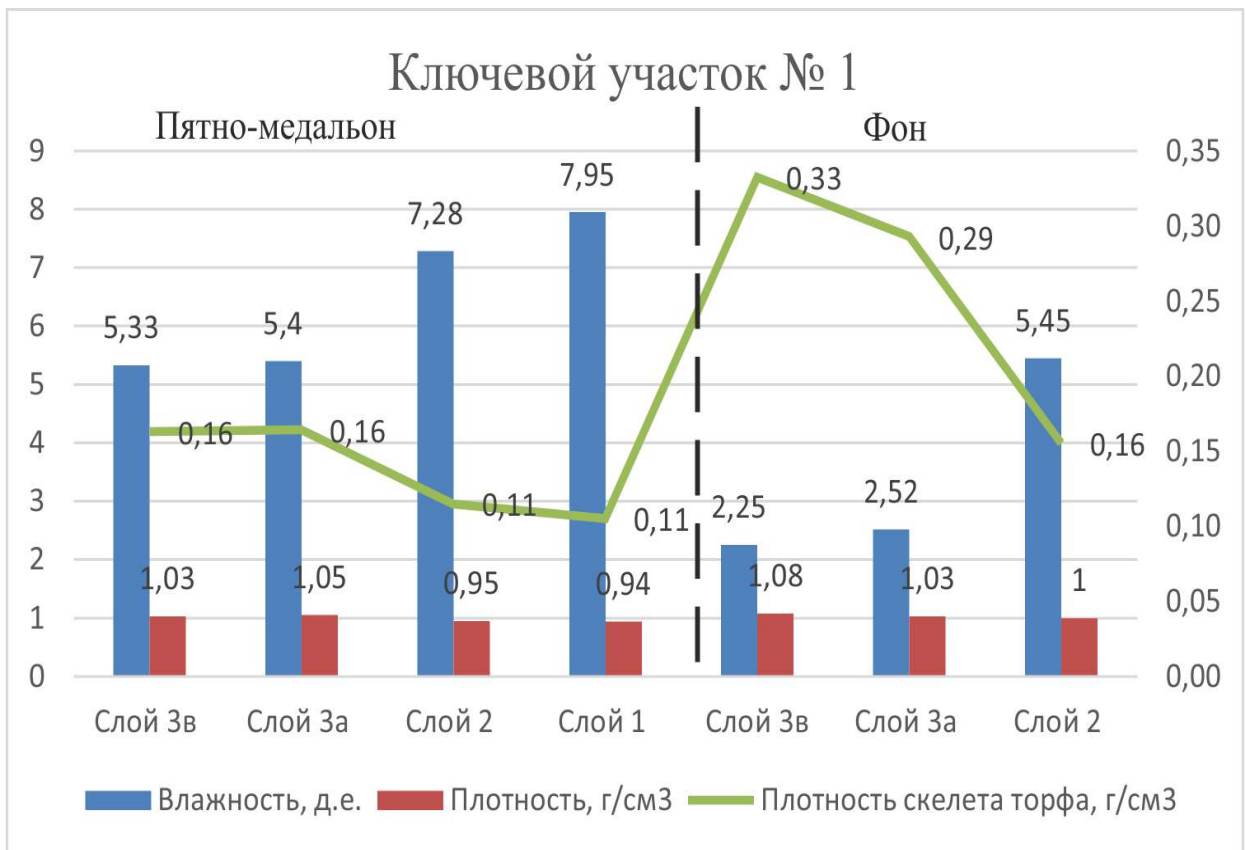


Рис. 50. Распределение плотности и влажности в пятнах-медальонах и в фоне на ключевом участке 1

Ориентировка и форма хасырея по отношению к дорожной насыпи также обеспечивало большее и более равномерное накопление снега на участке 1 и более позднее таяние снега, следовательно, и более сильное увлажнение поверхности и торфа СТС. Плотность имеет значения 1,03-0,94 г/см<sup>3</sup> в пятне-медальоне и 1,08-1 г/см<sup>3</sup> фонового торфа полигона. Плотность скелета грунта в фоне значительно выше - 0,33-0,16 г/см<sup>3</sup>, чем в пятне-медальоне - 0,16-0,11 г/см<sup>3</sup>. Это может быть связано с интенсивными криотурбациями фонового торфа полигонов, приведшим к более сильному уплотнению при пучении и просадках, по сравнению с ключевыми участками 2, 3.

**На ключевом участке 4** влажность в слое 3 в фоновом торфе полигонов ниже, чем в пятне-медальоне, что связано с застоём влаги в понижении поверхности в 2020 г (рис. 51).

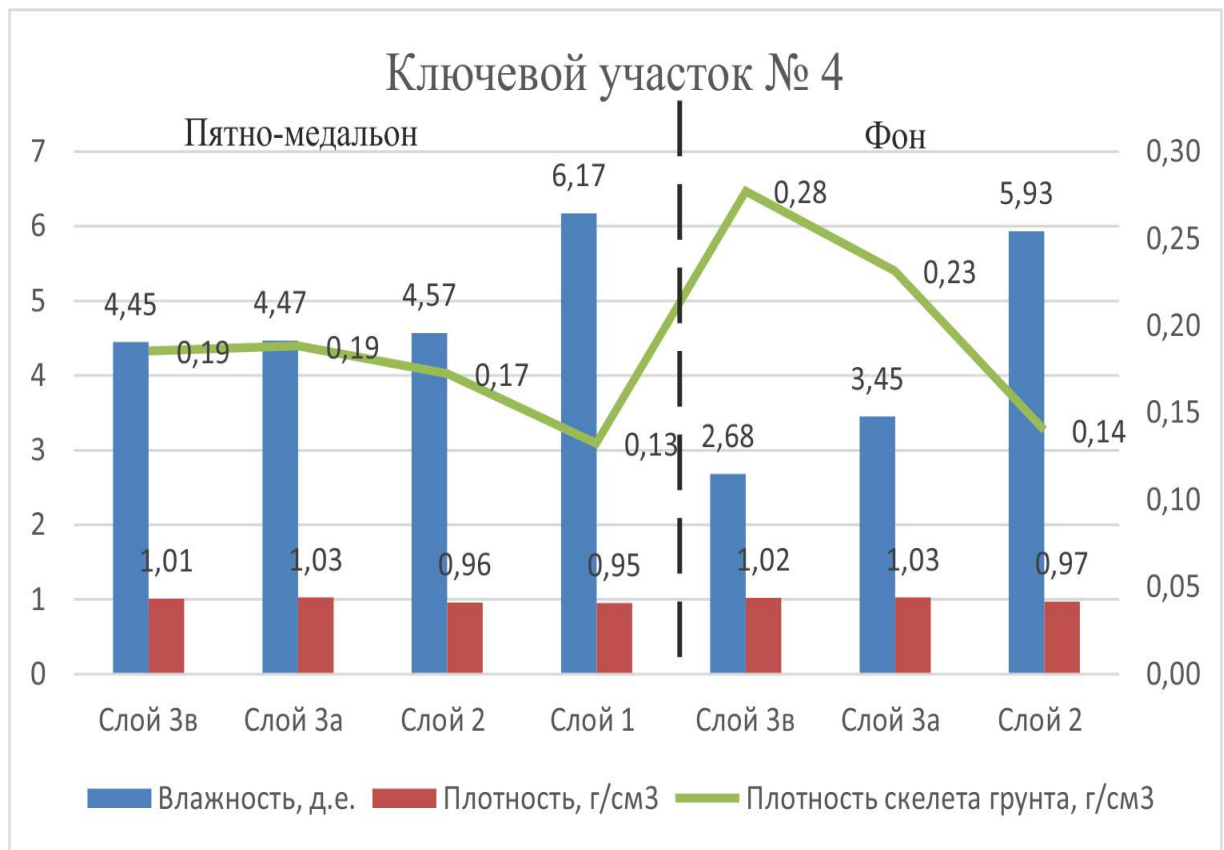


Рис. 51. Распределение плотности и влажности в пятнах-медальонах и в фоне на ключевом участке 4

Высокая влажность в слое 2 пятна-медальона и фонового торфа связана с близким залеганием грунтовых вод и большей обводненностью (отсутствием дренажа плоских полигонов и стока из термокарстовых просадок над вытаивающими ПЖЛ из-за искусственной дамбы). Слой 3 фонового торфа в полигонах также, как и на других участках, имеет высокие значения плотности скелета 0,28-0,23 г/см<sup>3</sup>, что, вероятно, способствует активному пятнообразованию (Приложение, табл. 13).

Различное распределение влажности и плотности в пятнах связано с:

- 1) густотой растительных покровов (фоновые части полигонов покрыты растительностью и отличаются меньшим испарением влаги из СТС, чем не покрытые растительностью органические пятна-медальоны);
- 2) микрорельефом, который влияет на распределение влаги;
- 3) излияниями органической массы в разные периоды одного теплого сезона;
- 4) антропогенно-техногенными нарушениями, которые связаны с застоем или стоком воды;
- 5) близким залеганием надмерзлотных вод;
- 6) образованием шлиров сегрегационного льда, увеличением плотности торфа в промежуточном слое, за счет отжатия влаги и миграции ее к фронтам промерзания, уплотнении при росте кристаллов льдов;
- 7) составом торфа, выносимого инъекциями из разных слоев разреза СТС.

Основным показателем вертикальной неоднородности разреза СТС является высокое значение плотности скелета отложений слоя 3 - 0,14-0,32 г/см<sup>3</sup> для всех участков.

В 2019 г были получены прочностные характеристики талого торфа слоев 3а и 3в методом неконсолидированного быстрого среза (рис. 52, 53). Испытания торфа проводились на ненарушенных образцах, отобранных при помощи пробоотборника для торфа и парафинированных по ГОСТ 12071-2014. Испытания образцов проводились в двух повторах для каждого слоя. Слой 3в был разделен на две части: верхнюю и нижнюю, в связи с большим количеством корешков растений в нижней части. Значения угла внутреннего

трения для слоя 3в в верхней части 17-18°, сцепление – 0,012-0,013 МПа. Для нижней части сцепление немного увеличивается и составляет 0,013-0,014 МПа, при этом угол внутреннего трения уменьшается и составляет 10-11°. Самые высокие значения угла внутреннего трения установлены в слое 3а и составляют 19-22°, сцепление – 0,009-0,01 МПа.

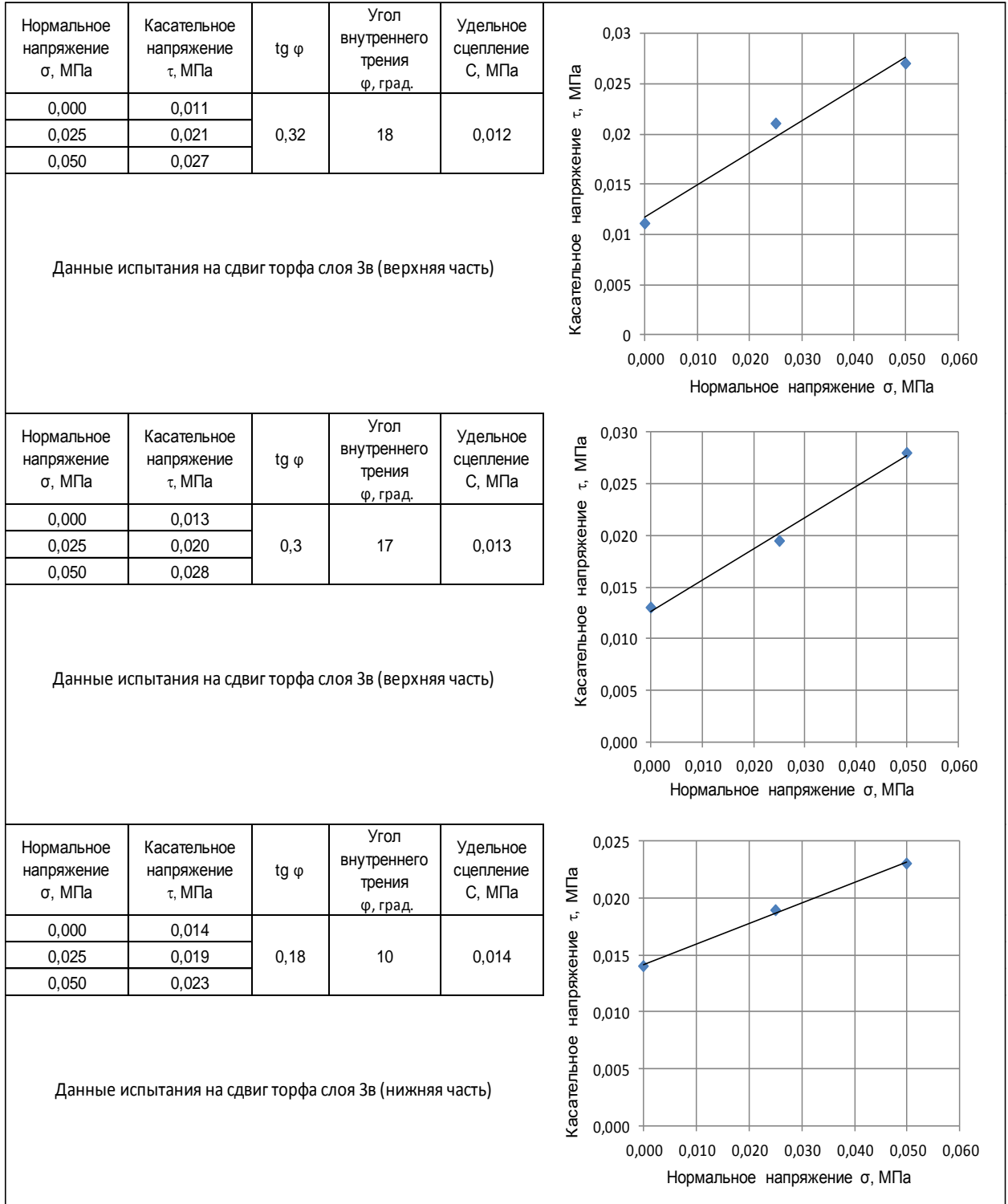


Рис. 52. Данные испытания на сдвиг торфа слоя 3в (верхняя и нижняя часть)



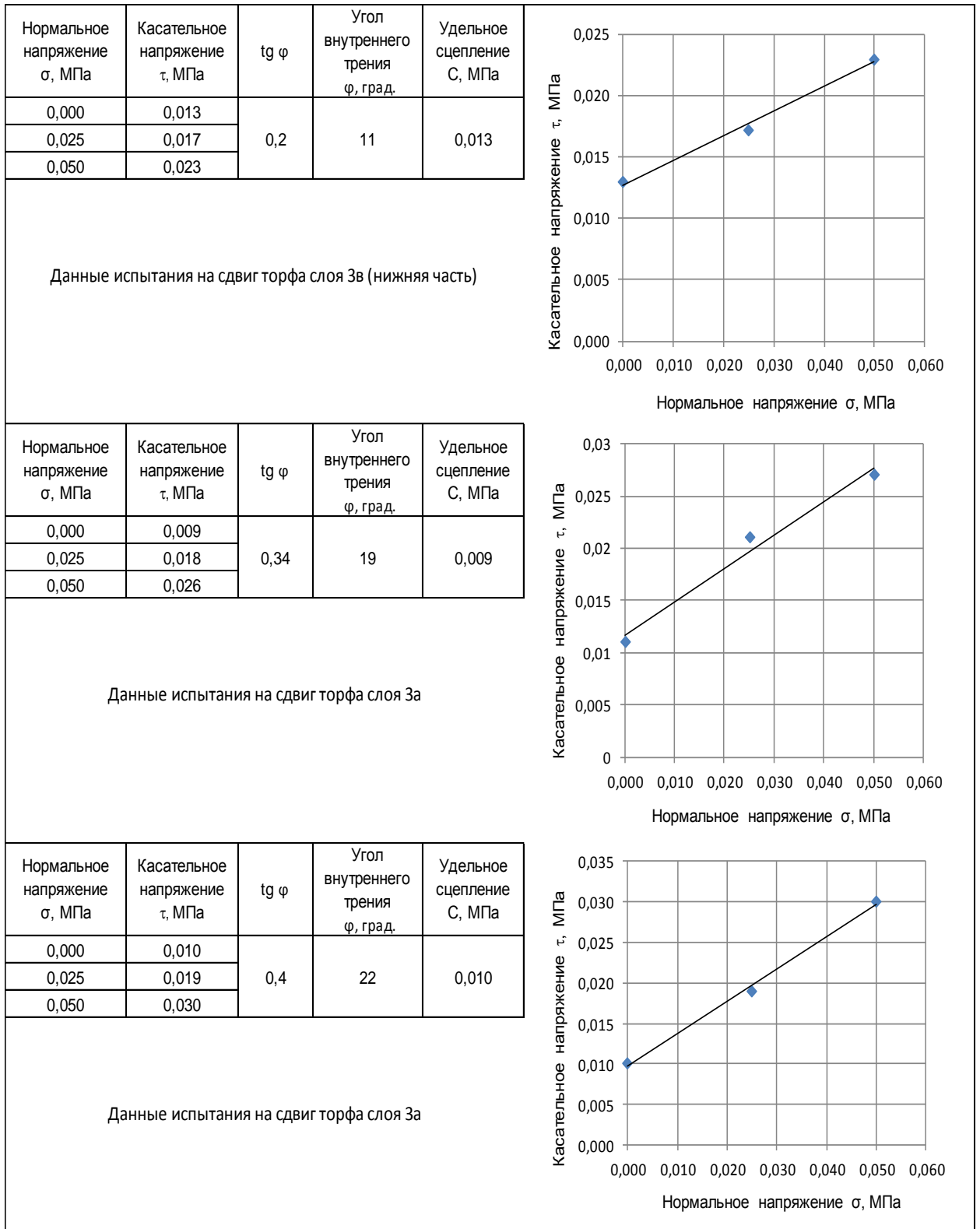


Рис. 53. Данные испытания на сдвиг торфа слоев 3в (нижняя часть) и 3а

По результатам ботанического состава в торфянике на ключевом участке 1 слой 3 имеет осоковый и сфагновый вид торфа (табл. 11). На ключевом участке 2 торф слоя 3 в расчистке В12-20 (табл. 7) имеет осоковый вид торфа. Торф слоя 3 имеет значения сцепления и угла внутреннего трения

близкие к сфагново-моховому торфу (сцепление -  $0,1 \text{ кг/см}^2$ , угол внутреннего трения -  $22^\circ$  по Методическим рекомендациям... [1981]. Торф слоя 3а и 3в сильно разложившийся, уплотненный, имеет вязко-пластичное состояние и обладает в 1,5-2,5 раза большими значениями плотности скелета, чем у слабо-разложившегося торфа слоя 1.

Основываясь на полученных данных высокой плотности скелета грунта и испытаниях на сдвиг, по которым торф имеет невысокие значения сцепления и угла внутреннего трения, можно говорить о том, что торф слоя 3 одновременно плотный и вязко-пластичный обеспечивает благоприятные условия для разрыва слоя 3 даже при небольшом увеличении давления.

### **3.3. Феноменологическая модель образования органических пятен-медальонов**

Излияние органической массы пятен-медальонов на ключевых участках южной тундры и лесотундры, как будет показано ниже, по косвенным и прямым признакам не связано с процессом промерзания. Необходимо установить механизм формирования органических пятен-медальонов в торфяниках Пур-Тазовского междуречья, учитывающий изменения свойств торфа, локальное увеличение глубины сезонного протаивания, переход буферной зоны ММП в талое состояние и факторы возникновения давления в приповерхностных условиях.

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. 54, 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 в кровле ММП (рис. 54, Б). Из-за увеличения глубины СТС на 9-20 см по сравнению с 1989 г [Геокриология СССР, 1989] произошло оттаивание неразложенного торфа переходного слоя 2, промежуточного слоя над синкриогенным торфом слоя 1 и синкриогенного торфа слоя 1 (рис. 54, 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 могло быть увеличение давления в замкнутой системе в локальном углублении в кровле мерзлоты и под уплотненным разложенным торфом слоя 3. В талом торфе промежуточного слоя и слоя 1 выделялся газ за счет жизнедеятельности микроорганизмов в свежееоттаявших неразложившихся растительных остатках. На активизацию и «взрывной рост» законсервированных бактерий, выделение и накопление парниковых газов при понижении кровли мерзлоты указывали исследования в Восточной Сибири [Ривкина и др., 2006]. Как показано в главе 2.5 шлиры сегрегационного льда имеют повышенные 6,7% от объема льда биогенных -  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$  и атмосферных газов [Бутакон, Слагода, Тихонравова, 2021]. 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 шлиров льда, которые существовали на контакте СТС и ММП (рис. 54, Б). Торф слоя 3 может служить крышкой ловушки для газов, накопившихся в торфе слоя 2. Судя по невысоким значениям сопротивления сдвигу слоя 3 (рис. 52, 53) при накоплении газов под ним в замкнутой ловушке возникает давление, достаточное для разрыва этого слоя и излияния газонасыщенной органической массы на поверхность.

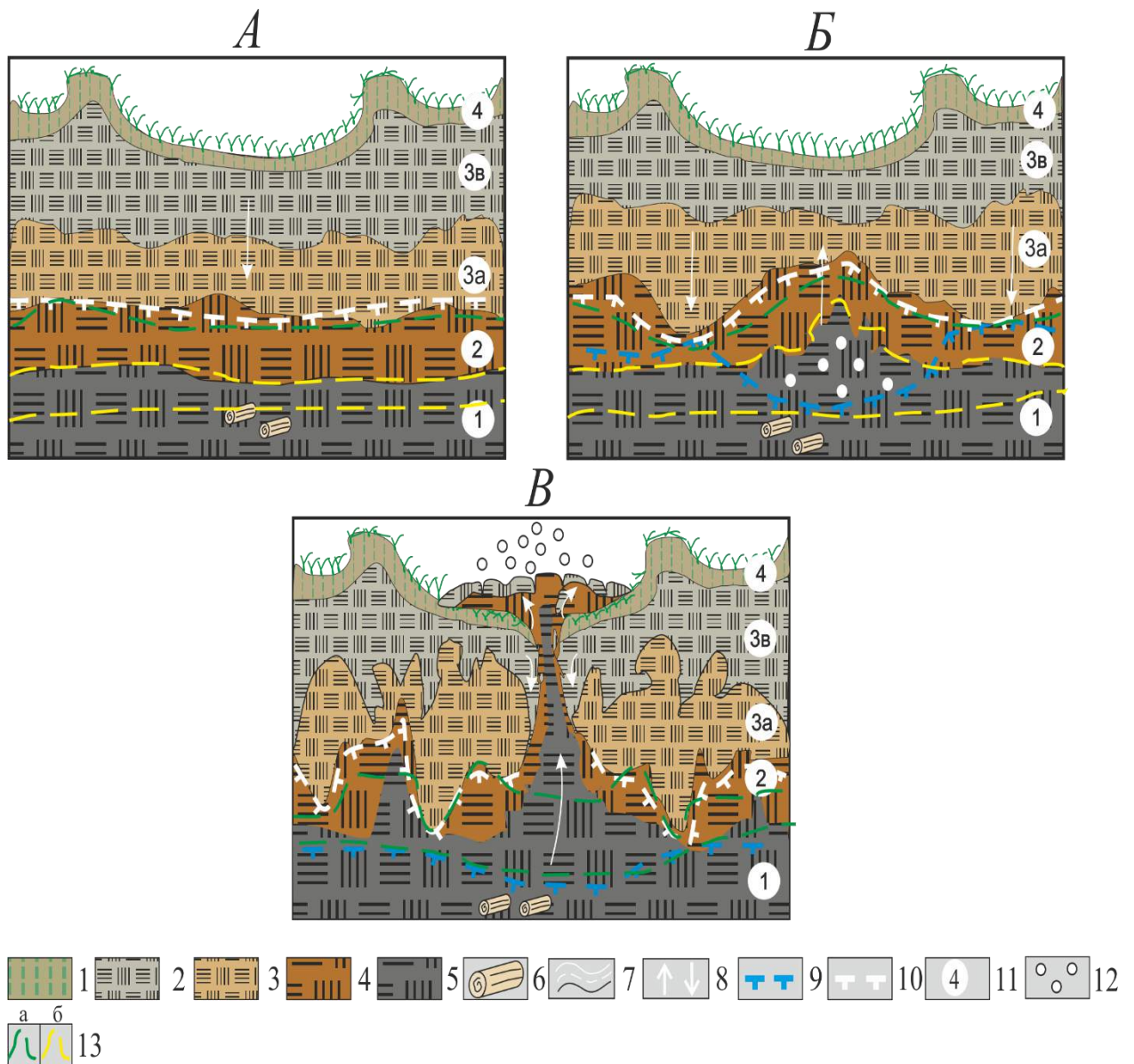


Рис. 54. Схема образования инъекций и органических пятен медальонов в теплый сезон года без участия промерзания (А, Б, В). Условные обозначения: 1-5 - слои торфа (см. описание в тексте); 6 - древесные остатки; 7 - границы слоев; 8 – направление инъекции и перемещения органического материала; 9 - современная граница ММП; 10 - реликтовая граница ММП; 11 - номер слоя; 12 - пузырьки газа. 13 - оттаявшие отложения переходного и промежуточного слоев (а), промежуточный слой (б)

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. 54, В). Следовательно, выделение газа в торфе в понижениях кровли мерзлоты, по-видимому, провоцирует инъекции органи-

минеральной массы, по форме подобные минеральным пятнам-медальонам, но формирование которых происходит на фоне протаивания, неравномерного углубления СТС и не связано с его промерзанием, как в минеральных пятнах-медальонах.

На основании полученных материалов установлено, что органические пятна-медальоны в изученных полигональных торфяниках были образованы и продолжают формироваться в теплые сезоны года. Об излиянии органической массы в теплые сезоны 2016-21 гг, на фоне протаивания органической воднонасыщенной массы свидетельствуют:

- органическая масса захоронила свежую зеленую растительность на поверхности;
- органические пятна-медальоны имеют выпуклую или слабоогнутую форму (при просадке после излияния), неровную поверхность, покрыты мелкими трещинками усыхания, не заселены растениями;
- пятна-медальоны имеют черный, темно-коричневый цвет (не окислены) и не размыты, т.е. их образование произошло после схода снега;
- пятна-медальоны предшествующего сезона были частично размыты дождем и талыми снеговыми водами и приобрели охристый, светло-коричневатый цвет, т.е. окислены и не заселены растениями;
- на поверхности органических пятен-медальонов присутствуют куски разорванной дернины с современными корешками.

Прямые свидетельства образования органических пятен-медальонов полигональных торфяников на ключевых участках получены по данным дистанционного зондирования с применением БПЛА [Cunliffe et al., 2019; Lousada et al., 2018] на двух временных срезах теплого сезона 2019 г (30 июня и в период максимального протаивания 15 сентября) (рис. 55).

Материалы съемок обработаны Хайруллиным Р.Р. в программе Agisoft Metashape Professional и представлены в виде ортофотопланов с разрешением ~ 0,02 м. Общая площадь пересечения летних и осенних съемок 4 отдельных площадок торфяных массивов составила около 0,4 км<sup>2</sup>. Для каждого участка

в результате наблюдений на местности выявлены черные пятна-медальоны и выполнен сравнительный анализ разновременных ортофотопланов [Королева и др., 2020].

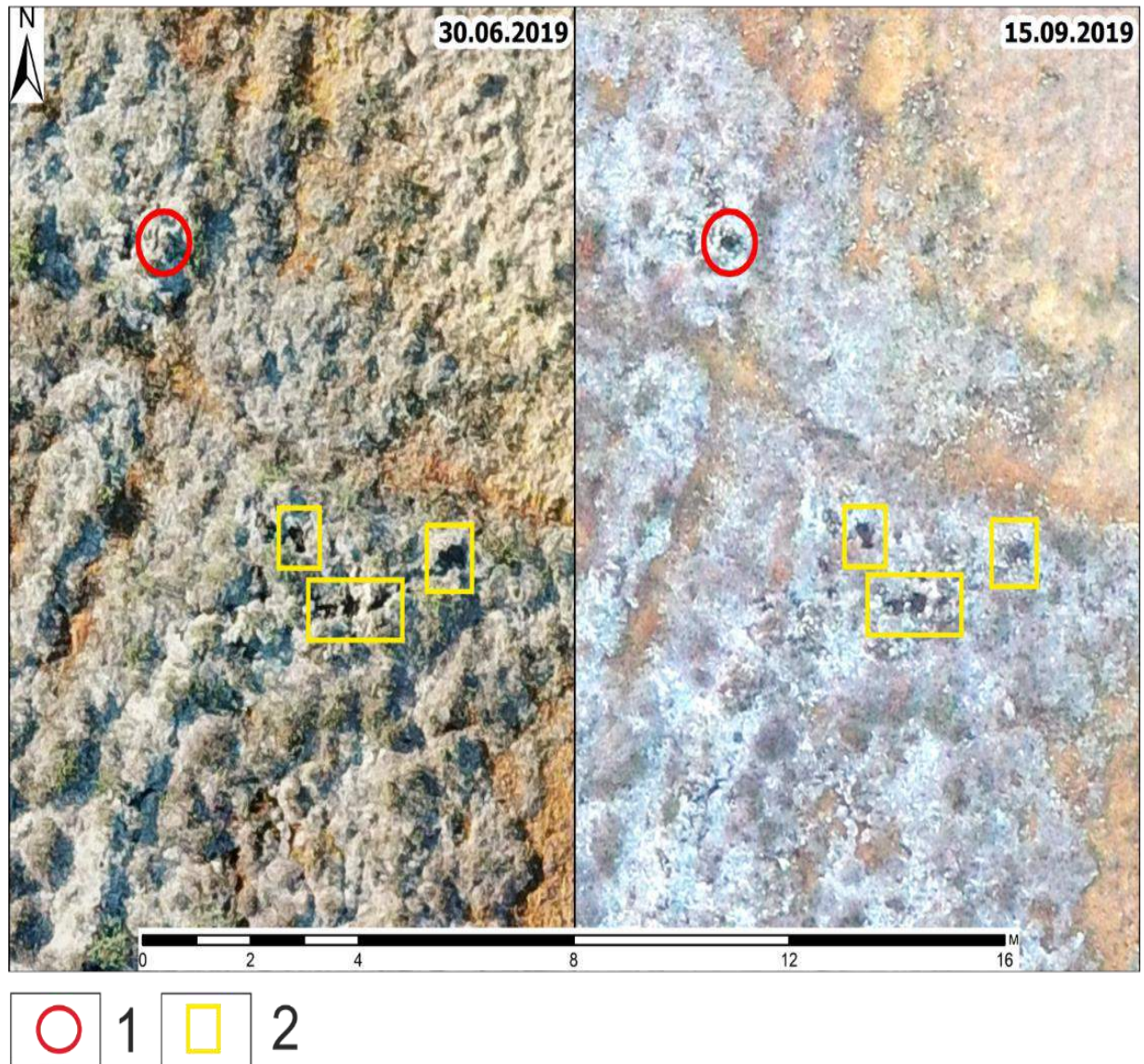


Рис. 55. Фрагменты ортофотопланов, построенных на основе съемок с БПЛА для торфяника 4 (Фото Р.Р. Хайруллина)

В результате сравнения июльских ортопланов с сентябрьскими, на последних выявлено 14 новых пятен-медальонов: 7 – на нарушенном и 7 – на фоновых участках (рис. 55). Наиболее четко пятна-медальоны выделены на поверхности торфяника ключевого участка 4, благодаря их большому размеру. Пятна-медальоны имеют округло-овальную форму и размеры: 40x47, 50x80, 12x16, 24x25 см. Их наличие на сентябрьских данных БПЛА и

отсутствие на более ранних июльских однозначно указывает на формирование органических пятен-медальонов именно в летний период между датами съемки [Королева и др., 2020].

В 2021 г была проведена аналогичная съемка при помощи БПЛА в июле и сентябре. Были обнаружены новообразованные в летний период органические пятна-медальоны (рис. 56).

Маршрутными наблюдениями проведена заверка данных БПЛА о новых пятнах-медальонах, зафиксированы свежие излияния торфа в органических пятнах-медальонах с выброшенными кусками дернины на поверхность (рис. 56).

Формирование органических пятен-медальонов в торфяниках хасыреев Пур-Тазовского междуречья связано с накоплением газа в надмерзлотном слое неразложенного торфа на фоне увеличением глубины СТС. Черные и темно-коричневые органические пятна-медальоны, развиваются на фоне локального протаивания кровли ММП и не связаны с его промерзанием, в отличие от образования минеральных пятен-медальонов. Инъекции органической массы на поверхность вызваны ростом давления в локальной замкнутой системе между современной углубленной подошвой СТС и реликтовой границей СТС холодного периода прошлого века, которая разделяет слои торфа разной плотности. Органические пятна-медальоны на поверхности и инъекции в разрезах полигональных торфяников могут служить индикатором неравномерного локального понижения кровли многолетнемерзлых пород на фоне повышения летних температур.

О более широком распространении черных органических пятен-медальонов в полигональных торфяниках на фоне современного повышения летних температур свидетельствуют наблюдаемые многочисленные слившиеся пятна в плоскобугристых торфяниках в северной тайге в районе г. Надым и на Европейском севере [Каверин и др., 2013, 2016; Огнева, Матышак и др., 2016]. В слившихся пятнах-медальонах северной тайги и Европейского севера затруднительно установить причины их образования,

т.к. многократные инъекции органической массы на поверхность, предположительно, могли уничтожить первоначально излитые пятна при неоднократном размыве талыми водами.

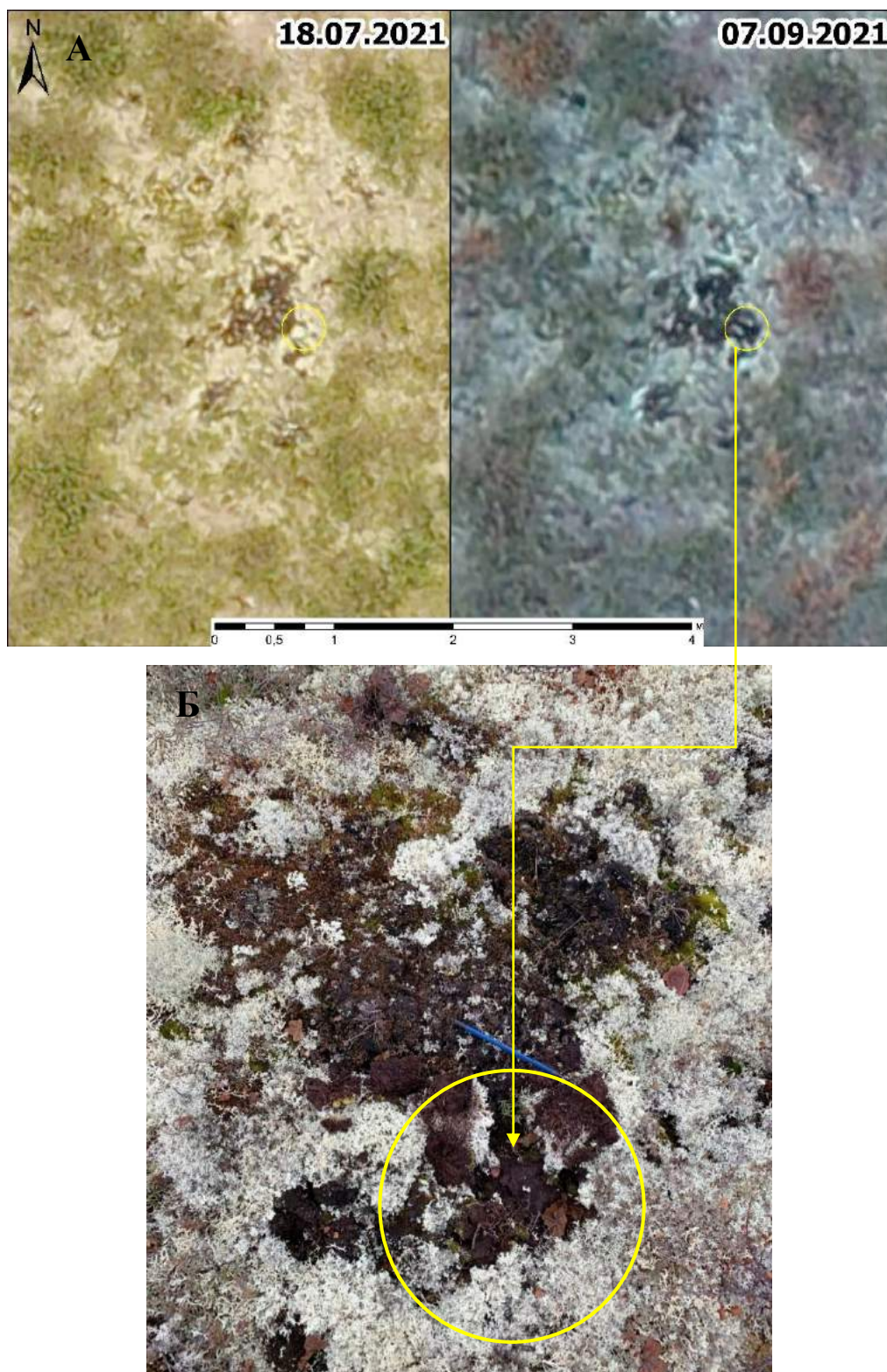


Рис. 56. Фрагменты ортофотопланов, построенных на основе съемок с БПЛА (А); фотография новообразованной части органического пятна-медальона с ортофотоплана (Б)



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

Формирование органических пятен-медальонов способствует развитию микрорельефа полигональных торфяников. Их образование приводит к более интенсивной переработке поверхности: ее затемнению, расширению межполигональных понижений. На поверхности торфяника существуют пониженные участки, заросшие мелкими кустами - это площади, на которых распространены слившиеся органические пятна-медальоны и где процесс пятнообразования уже завершился. Слияние пятен-медальонов происходит в пределах полигональных ванн и в межполигональных понижениях за счет деятельности снеговых и дождевых вод. При этом происходит уплотнение и зарастание поверхности. Вблизи межполигональных понижений по инъекциям пятен-медальонов возникают отрывы блоков грунта (рис. 57), их оползание, что ведет к расширению полигональных канав. Стеkanie отдельных пятен-медальонов в понижения способствует сглаживанию бортов канав и выравниванию полигонального микрорельефа.



Рис. 57. Отрыв блоков полигона по инъекциям органических пятен-медальонов (Фото Слагода Е.А.)

Увеличение количества органических пятен-медальонов указывает на: неравномерное понижение кровли многолетнемерзлых пород [Королева и др., 2019а; Koroleva, Slagoda, Tikhonravova, 2019], неравномерное пучение и осадки в пределах полигонов. В течение последних 4-х лет наблюдается слияние пятен и увеличение их площади как в центре, так и на валиках полигонов. Инъекции органического материала через слой плотного торфа способствуют возникновению трещин отрыва и оползанию блоков в межполигональные понижения. При этом происходит сокращение площади полигонов, снижение поверхности и перестройка микрорельефа поверхности полигональных торфяников.

Экологические последствия возникновения и распространения органических пятен-медальонов на торфяниках южной части криолитозоны Западной Сибири заключаются в следующем:

- 1) органические пятна-медальоны способствуют затемнению поверхности полигональных торфяников, что ведет к ее большему прогреву, увеличению температуры многолетнемерзлых пород и неравномерному снижению кровли мерзлоты;
- 2) увеличение площадей органических пятен-медальонов приводит к снижению поверхности полигональных торфяников и их заболачиванию;
- 3) по мере снижения поверхности торфяников может происходить их затопление и расширение площади акватории мелководных озер, а при сохранении современных тенденций изменения климата под озерами могут активизироваться термокарстовые процессы;
- 4) затопление полигональных торфяников приводит к нарушению функционирования дорог и трубопроводов за счет изменения базисов стока и развития термоэрозии [Королева, Слагода, Тихонравова, 2021а].

Проведенные исследования показали, что мониторинг изменения торфяников южной тундры Западной Сибири имеет большое значение для оценки их экологического состояния особенно вблизи нефтегазовых сооружений, поселков и транспортных магистралей.

**Выводы по главе 3:**

- 1) Органические пятна-медальоны развиваются в теплые периоды и могут служить индикатором неравномерного локального понижения кровли многолетнемерзлых пород на фоне повышения летних температур в полигональных торфяниках.
- 2) 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.
- 3) Ведущим процессом образования органических пятен-медальонов в торфяниках является оттаивание переходного и промежуточного слоев в верхней части разреза мерзлых грунтов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования в торфяниках Пур-Тазовского междуречья позволили установить буферную зону ММП, которая включает промежуточный и переходный слои, 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 визуальнo отличается желтовато-коричневым цветом.

2) Промежуточные слои в торфяниках характеризуются следующими признаками: линзовидными и слоистыми криогенными текстурами, льдистостью, включениями льдов: сегрегационных, термокарстово-полостных, инфильтрационно-сегрегационных и ростками ПЖЛ, повышенным содержанием газа в сегрегационных льдах и торфе. Также 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 шпирьы 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 шпиров, 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-Тазовского 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-газоторфонасыщенной 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 ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Амарян Л. С. Свойства слабых грунтов и методы их изучения. М.: Недра, 1990. 220 с.
2. Андреева В. Ю., Калинкина Г. И. Методы фармакогностического анализа лекарственного растительного сырья. Ч. 1. Правила приемки и общие методы испытаний. Томск: СибГМУ, 2008. 56 с.
3. Архив погоды в Тазовском // Расписание погоды rp5.ru: сайт. [Электронный ресурс]. URL: [http://rp5.ru/Архив\\_погоды\\_в\\_Тазовском](http://rp5.ru/Архив_погоды_в_Тазовском) (дата обращения: 2021 г.).
4. Архипов С. А., Волкова В. С. Геологическая история, ландшафты и климаты плейстоцена Западной Сибири / под ред. А. В. Каныгин. Новосибирск: НИЦ ОИГГМ СО РАН, 1994. 105 с.
5. Бабкин Е. М. и др. Изменение рельефа торфяника с вытаивающим полигонально-жильным льдом в северной части Пур-Тазовского междуречья // Проблемы региональной экологии. 2018. № 4. С. 115–119.
6. Бадю Ю. Б. Геологическое строение криогенной толщи севера Западной Сибири // Инженерная геология. 2011. № 2. С. 40–55.
7. База данных гидрометеорологических наблюдений суточного разрешения [Электронный ресурс]. URL: <https://ib.komisc.ru/climat/viewdata.php> (дата обращения: 2021 г.).
8. Борзенкова И. И., Зубаков В. А. Климатический оптимум голоцена как модель климата начала XXI века // Метеорология и гидрология. № 8. С. 69–77.
9. Бочкарев Ю. Н. Многолетняя динамика бугров пучения на севере Западной Сибири по данным дендрохронологии // Вопросы географии: Горизонты ландшафтоведения. М.: Издательский дом «Кодекс», 2014. С. 251–270.

10. Буданцева Н. А. Формирование повторно-жильных льдов и бугров пучения в голоцене: На примере Большеземельской тундры и севера Западной Сибири // 2003.
11. Бутаков В. И., Слагода Е. А., Тихонравова Я. В. Содержание и состав атмосферных и парниковых газов в подземных льдах разного генезиса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 11. С. 22–36.
12. Василевская В. Д., Иванов В. В., Богатырев Л. Г. Почвы севера Западной Сибири / под ред. В. Д. Василевская. М.: МГУ, 1986. 227 с.
13. Васильев А. А. и др. Деградация мерзлоты: результаты многолетнего геокриологического мониторинга в западном секторе Российской Арктики // Криосфера Земли. 2020. Т. XXIV. № 2. С. 15–30.
14. Васильчук Ю. К., Петрова Е. А., Серова А. К. Некоторые черты палеогеографии голоцена Ямала // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. 1983. № 52. С. 74–89.
15. Васильчук Ю. К. и др. Выпуклые бугры пучения многолетнемерзлых торфяных массивов / под ред. Ю. К. Васильчук. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. 571 с.
16. Васильчук Ю.К. и др. Миграционные бугры пучения на Севере Западной Сибири: южный и северный пределы ареала и современная Динамика // Инженерная Геология. 2012. Р. 18–32.
17. Васильчук Ю. К. Современное положение южной границы зоны многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской низменности // Криосфера Земли. 2013. Т. XVII. № 1. С. 17–27.
18. Васильчук Ю. К., Васильчук А. К. Мощные полигональные торфяники в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород Западной Сибири // Криосфера Земли. 2016. Т. XX. № 4. С. 3–15.
19. Гиличинский Д. А. Сезонная криолитозона Западной Сибири. Москва: 1986. Вып. Наука.
20. Геокриологический словарь. М.: ГЕОС, 2003. 140 с.

21. Геокриология СССР / под ред. Э. Д. Ершова. Москва: Недра, 1989. 454 с.
22. ГОСТ 10650-2013. Торф. Метод определения степени разложения. М.: Стандартиформ, 2014, 11 с.
23. ГОСТ 12071-2014. Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов. М.: Стандартиформ, 2019, 10 с.
24. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М.: Стандартиформ, 2010, 23 с.
25. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Стандартиформ, 2015, 23 с.
26. ГОСТ 25100-2011 Грунты. Классификация. М.: Стандартиформ, 2018. 45 с.
27. Груздов А. В., Трофимов В. Т. Распространение и температура многолетне- и сезонномерзлых пород // Криогенное строение и льдистость многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980. С. 29–57.
28. Губин С. В., Лупачев А. В. Почвообразование и подстилая мерзлота // Почвоведение. 2008. № 6. С. 655–667.
29. Домбровская А. В., Коренева М. М., Тюремнов С. Н. Атлас растительных остатков, встречаемых в торфе. М., Л.: , 1959. 228 с.
30. Дроздов Д. С. и др. Изменения температурного поля мерзлых пород и состояния геосистем на территории Уренгойского месторождения за последние 35 лет (1974–2008) // Криосфера Земли. 2010. Т. XIV. № 1. С. 22–31.
31. Игнатов М. С., Игнатова Е. А. Флора мхов средней части европейской России. Москва: КМК, 2003. 608 с.
32. Игнатов М. С., Игнатова Е. А. Флора мхов средней части европейской России. Москва: КМК, 2004. 944 с.



33. Инишева Л. И., Березина Н. А. Возникновение и развитие процесса заболачивания на Западно-Сибирской равнине // Вестник Томского государственного университета. 2013. № 366. С. 172–179.

34. Инишева Л. И., Сергеева М. А., Смирнов О. Н. Депонирование и эмиссия углерода болотами Западной Сибири // Научный диалог. 2012. № 7. С. 61–74.

35. Каверин Д. А. и др. Исследование тундровых мерзлотных почв в системе “Деятельный слой – многолетняя мерзлота” (северо-восток европейской России) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 1. С. 52–58.

36. Каверин Д. А., Пастухов А. В. Генетическая характеристика мерзлотных почв оголенных пятен на плоскобугристых торфяниках Большеземельской тундры // Известия Самарского. науч. центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 3. С. 55–62.

37. Каверин Д. А. и др. Строение и свойства почв многолетнемерзлых торфяников юго-востока Большеземельской тундры // Почвоведение. 2016. № 5. С. 542–556.

38. Каган Г. Л. Определение прочностных характеристик мерзлого торфа с учетом скоростного режима деформирования // Нефть и газ Тюмени. 1971. № 2. С. 112–121.

39. Каплина Т. Н. Аласные комплексы северной Якутии // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII. № 4. С. 3–17.

40. Карта «Природных комплексов севера Западной Сибири» // 1991.

41. Кац Н. Я., Кац С. В., Скобеева Е. И. Атлас растительных остатков в торфах. М.: Недра, 1977. 376 с.

42. Кашперюк П. И. Типы и инженерно-геологические особенности многолетнемерзлых торфяных массивов севера Западно-Сибирской плиты // 1985.

43. Королева Е. С. и др. Формирование пятен-медальонов в полигональных торфяниках Пур-Тазовского междуречья на фоне

современного потепления // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2019. № 6. С. 42–51.

44. 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: 2019а. Т.2, С.159-160

45. Королева Е.С. и др. 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

46. Королева Е.С. и др. Структурно-текстурные особенности генетических типов пластовых и жильных льдов и условия их образования в низовьях реки Гыда // Арктика и Антарктика. 2020а, № 4, С. 15-31.

47. Королева Е.С. и др. 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.

48. 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: 2021а. С. 136–138.

49. 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: 2021б. С. 35-37.

50. Костюк Н. С. Физика торфа / под ред. Н. В. Кислов. Минск: Вышэйшая школа, 1967. 213 с.

51. Лисс О. Л. и др. Болотные системы западной Сибири и их природоохранное значение / под ред. В. Б. Куваева. Тула: Гриф и К, 2001. 584 с.
52. Лиштван И. И. и др. Физика и химия торфа/Учеб. пособие для вузов. М.: Недра, 1989. 304 с.
53. Лупачев А. В., Губин С. В. Участие почвообразования в формировании и организации переходного слоя многолетнемерзлых пород // Криосфера Земли. 2008. Т. XII. № 2. С. 75–83.
54. Лупачев А. В., Губин С. В. Органогенные надмерзлотно-аккумулятивные горизонты криоземов тундр севера Якутии // Почвоведение. 2012. № 1. С. 57–68.
55. Матышак Г. В. Особенности формирования почв Западной Сибири в условиях криогенеза // Автореф. ... дис. канд. геол.-мин. наук. Москва. 2009.
56. 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.
57. Мерзлотоведение / под ред. В. А. Кудрявцева. М.: Изд-во Моск ун-та, 1981. 240 с.
58. Методы изучения осадочных пород / под ред. Н. М. Страхов и др. М.: Государственное НТИ литературы по геологии и охране недр, 1957. 566 с.
59. Методические рекомендации по сбору инженерно-геологической информации и использованию табличных геотехнических данных при проектировании земляного полотна автомобильных дорог. Москва: СОЮЗДОРПРОЕКТ, 1981.
60. Нейштадт М. И. Мировой природный феномен - заболоченность Западно-Сибирской равнины // Изв. АН СССР. 1971. № 1–3. С. 81–88.

61. Нейштадт М. И. Голоценовые процессы в Западной Сибири и возникающие в связи с этим проблемы // Сб. «Изучение и освоение природной среды». М.: 1976. С. 90–99.
62. Общая геокриология / под ред. Э. Д. Ершова. М.: Изд-во МГУ, 2002. 682 с.
63. Общее мерзлотоведение / под ред. В. А. Кудрявцев. Москва: МГУ, 1978. Вып. 2, переработанное и дополненное. 464 с.
64. Огнева О. А. и др. Почвы торфяных пятабугристых торфяников севера Западной Сибири // Криосфера Земли. 2016. Т. XX. № 2. С. 23–41.
65. 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.
66. Попов А. И., Розенбаум Г. Э., Тумель Н. В. Криолитология. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1985. 239 с.
67. Пьявченко Н. И. Освоение заболоченных площадей – один из важных путей развития сельского хозяйства в лесной зоне // Труды института леса. М.: Изд-во Академии Наук СССР, 1955. С. 5–17.
68. Пьявченко Н. И. К изучению палеогеографии севера Западной Сибири в голоцене // Палинология голоцена. М.: , 1971. С. 58–67.
69. Региональная криолитология / под ред. А. И. Попова. Москва: МГУ, 1989.
70. Ривкина Е. М. и др. Метан в вечномерзлых отложениях северо-восточного сектора Арктики // Криосфера Земли. 2006. Т. X. № 3. С. 23–41.
71. Роман Л. Т. Мерзлые торфяные грунты как основания сооружений. Новосибирск: Изд-во. «Наука», 1987. 224 с.
72. Романов В. В. Гидрофизика болот. Л.: Гидрометеорологическое изд-во., 1961. 361 с.
73. Романовский Н. Н. Формирование полигонально-жильных структур. Новосибирск: Изд-во «Наука», 1977. 216 с.

74. Романовский Н. Н. Основы криогенеза литосферы. Уч. пос. М.: МГУ, 1993. 336 с.
75. Савельев Б. А. Руководство по изучению свойств льда. М.: Изд-во МГУ, 1963. 198 с.
76. Слагода Е. А., Кузнецова А. О., Тихонравова Я. В. Автохтонный голоценовый торфяник и причины нарушения стратиграфической последовательности датировок в криолитозоне на севере Западной Сибири // Тезисы докладов всероссийской научной конференции (с международным участием) «Геохронология четвертичного периода: инструментальные методы датирования новейших отложений». Москва: 2019. С. 88.
77. СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах.
78. Тихонравова Я. В. и др. Текстура и структура подземных льдов позднего голоцена севера Западной Сибири // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 4. С. 553–564.
79. Тихонравова Я. В. Особенности строения полигонально-жильных льдов севера Гыданского полуострова и Пур-Тазовского междуречья // Дис. канд. геол.-мин. наук. Якутск. 2019.
80. Тихонравова Я. В. и др. Гетерогенное строение полигонально-жильных льдов в торфяниках Пур-Тазовского междуречья // Лёд и Снег. 2020. Т. 60. № 2. С. 225–238.
81. Трофимов В. Т. Закономерности пространственной изменчивости инженерно-геологических условий Западно-Сибирской плиты. М.: МГУ, 1977. 277 с.
82. Трофимов В. Т. и др. Геокриологическое районирование Западно-Сибирской плиты. М.: Наука, 1987. 219 с.
83. Трофимов В. Т., Баду Ю. Б., Дубиков Г. И. Криогенное строение и льдистость многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты. М.: Изд-во МГУ, 1980. 246 с.

84. Тыртиков А. П. Динамика растительного покрова и развитие мерзлотных форм рельефа. М.: Наука, 1979. 116 с.
85. Тюремнов С. Н. Торфяные месторождения. М.: Недра, 1976. Вып. 3-е, перераб. и доп. 488 с.
86. Уошборн А. Л. Мир холода, геокриологические исследования / под ред. Б. И. Втюрина. М.: , 1988. 384 с.
87. Усов В. А. Криогенный литогенез в условиях болотного ландшафта // Вестник Ленингр. ун-та,. 1980. № 6. С. 40–44.
88. Хомутов А. В. и др. Комплексные исследования криолитозоны северо-восточной части Пур-Тазовского междуречья // Научный вестник ЯНАО. 2019. Т. 102. № 1. С. 54–64.
89. Шполянская Н. А. Основные закономерности распространения вечной мерзлоты Западной Сибири и этапы ее развития // Природные условия Западной Сибири. 1971. № 1. С. 102–123.
90. Штин С. М. Гидромеханизированная добыча торфа и производство торфяной продукции энергетического назначения / под ред. И. М. Ялтанца. М.: Издательство «Горная книга», 2012. 360 с.
91. Шумский П. А. Основы структурного ледоведения. Петрография пресного льда как метод гляциологического исследования. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 492 с.
92. Шур Ю. Л. Верхний горизонт толщи мерзлых пород и термокарст. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-е, 1988. 213 с.
93. Яновский В. К. Экспедиция на р. Печору по определению южной границы вечной мерзлоты // Труды комиссии по изучению вечной мерзлоты. Л.: , 1933. С. 65–149.
94. Cunliffe A. M. et al. Rapid retreat of permafrost coastline observed with aerial drone photogrammetry // The Cryosphere. 2019. Т. 13. № 5. С. 1513–1528.
95. Koroleva E. S., Slogoda E. A., Tikhonravova Ya. V. Frost boils of the Pur-Taz interfluvium // International conference “Solving the puzzles from Cryosphere”. Pushchino, Russia: 2019. С. 54–55.

96. Kuznetsova A. O. et al. Dynamics of local conditions of peat accumulation in the Holocene of the southern tundra of the PurTaz interfluves // International conference “Solving the puzzles from Cryosphere”. Pushchino, Russia: 2019. C. 81–82.
97. Lachenbruch A. H. Mechanics of Thermal Contraction Cracks and Ice-Wedge Polygons in Permafrost // Geological Society of America. Special Papers. : Geological Society of America, 1962. C. 1–66.
98. Leffingwell E. de K. Ground-Ice Wedges: The Dominant Form of Ground-Ice on the North Coast of Alaska // The Journal of Geology. 1915. T. 23. № 7. C. 635–654.
99. Lousada M. et al. Evaluation of the use of very high resolution aerial imagery for accurate ice-wedge polygon mapping (Adventdalen, Svalbard) // Science of The Total Environment. 2018. T. 615. C. 1574–1583.
100. Mackay J. An equilibrium model for hummocks (nonsorted circles), Garry Island, Northwest Territories // Current Research, Part A. Geological Survey of Canada Paper. 1979. C. 165–167.
101. Peteet D. et al. Long-term Arctic peatland dynamics, vegetation and climate history of the Pur-Taz region, Western Siberia // Boreas. 2008. T. 27. № 2. C. 115–126.
102. Seppälä M. Surface abrasion of palsas by wind action in Finnish Lapland // Geomorphology. 2003. T. 52. № 1–2. C. 141–148.
103. Shur Y., Hinkel K. M., Nelson F. E. The transient layer: implications for geocryology and climate-change science // Permafrost Periglac. Process. 2005. T. 16. № 1. C. 5–17.
104. Slagoda E. A. et al. Cryoturbations, pseudomorphs, postcryogenic textures and involutions in the frozen sediments of the Pur-Taz interfluves Siberia // International conference “Solving the puzzles from Cryosphere”. Pushchino, Russia: 2019. C. 109–110.

105. Tikhonravova Y.V., Rogov V.V., Slagoda E.A. Genetic Identification of Ground Ice By Petrographic Method. *Geography, Environment, Sustainability*. 2021; 14(4): 20-32.



# **ПРИЛОЖЕНИЕ**

Таблица 12 – физические свойства торфа в торфяниках Пур-Газовского междуречья

№ разреза	№ слоя	Описание	Влажность, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>
<b>В12п-20</b>	6	торф темно-коричневый, плотный, СТС	346	0,70
			303	0,71
			318	0,76
	5	торф коричневый, СТС	377	0,69
			346	0,66
			343	0,73
	4	торф автохтонный, СТС	414	0,60
			406	0,60
			444	0,65
	3	торф автохтонный, ММП	1126	0,97
			1897	0,96
			1077	0,96
	3	торф автохтонный, ММП	2048	0,95
			1208	0,96
			2091	0,96
	3	торф автохтонный, ММП	2318	0,95
			2090	0,95
			2304	0,95
	2	торф автохтонный, ММП	1359	0,96
			1464	0,96
			1245	0,96
	1	торф автохтонный, ММП	1850	0,95
			2093	0,94
			1998	0,96
<b>В8п-20</b>	3	торф рыжий рыхлый и коричневый плотны, криотурбированный, СТС	394	0,86
			355	0,86
			462	0,84

№ разреза	№ слоя	Описание	Влажность, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>
	2	торф коричневый плотный, СТС	299	0,94
			340	0,99
			342	0,94
	1а	торф черный, СТС	363	0,54
			392	0,59
			393	0,57
	1	торф черный, СТС	519	0,69
			449	0,73
			463	0,84
	1	торф черный, ММП	1413	0,95
			1633	0,95
			1714	0,96
			1909	0,99
			1283	0,99
			1238	0,98
			1600	0,95
			1487	0,95
			1485	0,96
			1297	0,96
			1300	0,96
			1909	0,96
			1417	0,96
			1283	0,95
			1280	0,96
<b>В8ж1-20</b>	3	торф темно-оранжевый и темно-коричневый, криотурбированный, СТС	797	1,00
			863	0,85
			843	0,95

№ разреза	№ слоя	Описание	Влажность, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>
			733	1,02
			682	0,82
			682	1,08
		торф темно-оранжевый, ММП	598	0,96
			839	0,95
			615	0,93
		торф темно-коричневый, ММП	537	0,99
			552	1,00
			577	0,99
	2	торф коричневый плотный, СТС	249	0,95
			198	1,00
			191	0,99
	1	торф многолетнемерзлый	948	0,96
			997	0,98
			1038	0,97
<b>В8ж2-20</b>	3	торф темно-оранжевый, СТС	735	0,82
			944	1,04
			660	0,90
			799	0,99
			834	0,95
			823	0,95
	3	торф темно-коричневый, СТС	162	1,16
			217	1,11
			172	1,09
			342	0,95
			343	1,11
			310	1,06
		темно-коричневый торф в инъекции		0,81
		темно-коричневый торф в инъекции		0,90

№ разреза	№ слоя	Описание	Влажность, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>
	1	торф черный многолетнемерзлый	558	0,94
			931	0,89
			1050	0,92
		торф черный многолетнемерзлый близ термокарстово-полостного льда	1842	0,98
			1712	0,95
			1635	0,97
			1463	0,98
			1015	0,98
			1073	0,96
			1016	0,98
			1056	0,93
			1483	0,95

Таблица 13 – физические свойства органических пятен-медальонов в торфяниках Пур-Тазовского междуречья

Ключевой участок 2			Ключевой участок 1		
Пятно-медальон 1	Влажность, %	Плотность, г/см	Пятно-медальон 4	Влажность, %	Плотность, г/см
слой 3в	322	1,03	слой 3в	637	1,03
	315	1,00		426	1,03
	291	1,02		536	1,04
Слой 3а	425	0,96	Слой 3а	528	0,99
	365	0,95		556	1,08
	400	0,94		536	1,08
Слой 2	420	0,71	Слой 2	735	0,92
	468	0,89		723	0,95
	472	0,84		725	0,98
Слой 1	569	0,88	Слой 1	789	0,94
	588	0,87		797	0,94

	566	0,85		797	0,94
<b>Фон для пятна-медальона 1</b>	Влажность, %	Плотность, г/см	<b>Фон для пятна-медальона 4</b>	Влажность, %	Плотность, г/см
слой 3в	282	1,00	слой 3в	219	1,03
	218	0,96		225	1,02
	269	1,04		230	1,18
Слой 3а	413	0,90	Слой 3а	213	0,99
	415	0,87		270	1,01
	552	0,88		271	1,09
Слой 2	444	0,91	Слой 2	574	1,01
	423	0,83		476	1,01
	459	0,80		585	0,99
Слой 1	474	0,76	<b>Ключевой участок 3</b>		
	497	0,78	<b>Пятно-медальон 5</b>	Влажность, %	Плотность, г/см
	460	0,71	слой 3в	347	1,07
<b>Пятно-медальон 2</b>	Влажность, %	Плотность, г/см		300	1,00
слой 3в	397	1,03		319	1,00
	388	1,05	Слой 3а	431	0,94
	377	1,08		411	0,89
Слой 3а	436	1,01		429	0,97
	451	0,90	Слой 2	455	0,89
	455	0,92		439	0,89
Слой 2	321	0,75		454	0,94
	485	0,85	Слой 1	566	0,82
	496	0,81		544	0,89
Слой 1	511	0,79		521	0,92
	640	0,79	<b>Фон для пятна-медальона 5</b>	Влажность, %	Плотность, г/см

	501	0,82	слой 3в	362	1,02
<b>Фон для пятна-медальона 2</b>	Влажность, %	Плотность, г/см		358	0,96
слой 3в	382	1,00		363	1,04
	369	0,97	Слой 3а	572	0,91
	405	1,02		550	0,87
Слой 3а	474	0,97		541	0,91
	467	0,91	Слой 2	513	0,86
	358	0,94		591	0,88
Слой 2	400	0,87		582	0,92
	423	0,78	Слой 1	588	0,87
	472	0,82		609	0,84
Слой 1	512	0,91		599	0,89
	446	0,80	<b>Ключевой участок 4</b>		
	318	0,77	<b>Пятно-медальон 6</b>	Влажность, %	Плотность, г/см
<b>Пятно-медальон 3</b>	Влажность, %	Плотность, г/см	слой 3в	426	0,99
слой 3в	303	1,04		470	1,03
	273	1,04		439	1,01
	223	1,03	Слой 3а	467	1,03
Слой 3а	447	0,92		429	1,06
	422	0,90		444	0,99
	429	0,93	Слой 2	498	0,93
Слой 2	530	0,78		343	0,98
	520	0,75		529	0,96
	481	0,79	Слой 1	565	1,00
Слой 1	590	0,83		669	0,93
	557	0,80		616	0,93
	601	0,85	<b>Фон для пятна-</b>	Влажность, %	Плотность, г/см

			<b>медальона б</b>		
<b>Фон для пятна- медальона 3</b>	Влажность, %	Плотность, г/см	слой 3в	418	1,01
слой 3в	341	0,97		119	1,00
	314	1,03		268	1,05
	385	0,96	Слой 3а	431	1,02
Слой 3а	428	0,88		298	1,05
	425	0,88		305	1,02
	392	0,92	Слой 2	656	0,97
Слой 2	452	0,86		562	0,95
	413	0,81		561	1,00
	477	0,87			
Слой 1	498	0,84			
	522	0,87			
		0,87			