На правах рукописи

Демидов Василий Эдуардович

ГИДРОЛАККОЛИТЫ АРХИПЕЛАГА ШПИЦБЕРГЕН

Научная специальность 1.6.14. Геоморфология и палеогеография

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук

> Москва 2024

Работа выполнена в Отделе географии полярных стран Федерального государственного бюджетного учреждения «Арктический и антарктический научноисследовательский институт» (г. Санкт-Петербург)

Научный руководитель:

Романенко Фёдор Александрович, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник кафедры геоморфологии и палеогеографии географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Официальные оппоненты:

Лейбман Марина Оскаровна - доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института криосферы Земли Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук;

Маккавеев Александр Николаевич - кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник Института географии Российской академии наук;

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научноисследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга» (ВНИИОкеангеология).

Защита диссертации состоится 14 февраля 2025 г. в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.1.049.02 на базе ФГБУН «Институт географии Российской академии наук» по адресу: 119017, г. Москва, Старомонетный переулок, д. 29, стр. 4. Факс: (495) 959-00-16, е-mail: d00204603@igras.ru C диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института географии РАН и на интернет-сайте: http://igras.ru/.

Отзывы на автореферат (в электронном виде и на бумажном носителе в одном экземпляре) просим направлять по адресу: 119017, Москва, Старомонетный переулок, д. 29, стр. 4, Институт географии РАПН, Диссертационный совет 24.1.049.02, е-mail: d00204603@igras.ru.

Автореферат разослан «___» ____ 2024 года.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат географических наук

Белоновская Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Вечная мерзлота динамично реагирует на изменения климата. На контакте атмосферы, гидросферы и литосферы формируются и тают подземные ледяные тела разного рода, что отражается в изменениях рельефа поверхности. Одной из самых характерных форм рельефа приполярных районов являются однолетние и многолетние бугры пучения (гидролакколиты), в строении ядра которых принимают участие массивный лед и ледогрунт.

На формирование ледяного или льдистого ядра гидролакколита влияют интенсивность промерзания, наличие подтока подземных вод или условий для их изоляции, локальная геологическая и тектоническая обстановка, отсутствие препятствий в виде ледниковых покровов и морских трансгрессий (Толстихин, 1941; Müller, 1959; Liestol, 1977; Mackay, 1979). Изменения климата обычно приводят к появлению гидролакколитов при похолоданиях и исчезновению при потеплениях. В связи с этим изучение современного расположения, морфологии и динамики гидролакколитов, в особенности многолетних, дает возможность реконструировать палеогеографическую обстановку и климат разных эпох. Выявление особенностей строения, химического и изотопного состава ледяных ядер, а также круглогодичных наледных источников, выходящих на поверхность в основании некоторых бугров пучения, позволяет при поиске источников водоснабжения в полярных регионах определять характеристики глубинных водоносных горизонтов, не прибегая к дорогостоящему бурению.

Вытянутые цепочки гидролакколитов или овальных бугров – индикатор разломов земной коры, по которым происходит питание ледяных тел подземными водами (Wu et al., 2005). Таким образом, их выявление дает возможность выявлять и картировать структурные тектонические нарушения в районах, где отсутствуют обнажения горных пород. Это особенно актуально для днищ долин архипелага Шпицберген, заполненных рыхлыми четвертичными осадками.

Кроме того, реконструкция условий формирования многолетних бугров пучения необходима для прогнозирования их появления и развития в районах, где ведется интенсивное строительство, так как динамичное пучение – серьезная угроза для инфраструктуры. Особенно это актуально в связи с современным интересом к освоению нефтегазовых ресурсов Арктики.

Изучение гидролакколитов, их морфологии, динамики, географического распределения, внутреннего строения и условий формирования необходимо также для поиска подобных объектов на других планетах, в частности на Марсе, где на космоснимках уже выявлена целая серия подобных форм (Burr et al., 2009; Dundas and McEwen, 2010; Soare et al., 2014).

Архипелаг Шпицберген расположен в высоких широтах и в настоящее время весь находится в зоне сплошного развития вечной мерзлоты (Humlum et al, 2003). Шпицберген, представляя собой горный, тектонически активный район, неоднократно испытывавший увеличение и снятие ледниковой нагрузки, сильно отличается от прибрежных арктических равнин, где расположено и изучалось основное количество многолетних бугров пучения (Grosse, Jones, 2011). Изучение гидролакколитов горных стран важно для выявления механизмов образования подземных льдов в условиях значительных перепадов рельефа и наличия оледенения. Требует объяснения также и сам феномен появления гидролакколитов в горах высокой Арктики, поскольку далеко не каждый остров и архипелаг являются ареной их развития.

Появившиеся за последнее десятилетие ортофотопланы и цифровые модели рельефа, покрывающие большие территории, стали уникальным инструментом в

статистическом анализе морфологии бугров пучения. В 2012 году были опубликованы результаты анализа 1247 равнинных гидролакколитов Северной Аляски на основе цифровой модели рельефа IfSAR, покрывающей площадь в 63000 кв. км (Jones et al., 2012). Для Аляски и равнинных областей Северной Азии существуют базы данных морфологии и географического распределения гидролакколитов, составленные по аэрофотоснимкам, современным картам и цифровым моделям рельефа (Holmes et. al, 1968; Walker et al., 1985; Grosse, Jones, 2011; Jones et. al, 2012). На Шпицбергене выполнено полное описание гидролакколитов на основе визуального анализа аэрофотоснимков и литературных данных (Liestøl, 1977). Современная цифровая модель рельефа Норвежского полярного института S0 Terrengmodel Svalbard с разрешением 2-5 м (Terrengmodell Svalbard, 2014) и соответствующий ортофотоплан (максимальный масштаб 1:625 и разрешение 0.165 м), стали уникальным инструментом для получения численных характеристик - в первую очередь высотного положения и размеров гидролакколитов. Кроме того, появление новых аэрофотоснимков высокого разрешения 2009-2012 гг. большой точностью анализировать различные характеристики позволяет с гидролакколитов - наличие растительности, наледных источников и др., а сравнение их со снимками 1936-1938 гг. - получать данные о динамике гидролакколитов.

Строение и источники питания грунтовыми водами равнинных многолетних бугров пучения в тундрах России и Канады изучены методами сквозного бурения с отбором кернов льда на химический, изотопный и кристаллографический анализ (Mackay, 1979; 1998; Yoshikawa et al., 2012; Васильчук и др., 2014; Чижова, Васильчук, 2018; Wetterich et al., 2018). В результате получены данные по гидростатическому механизму формирования гидролакколитов. Гидролакколиты горных районов с развитием вечной мерзлоты (Канадский арктический архипелаг, Аляска, Монголия, Северо-Восточная Якутия, Шпицберген), где механизм их формирования отличается наличием гидравлического напора подземных вод, изучен в меньшей степени. Для Шпицбергена до настоящей работы не существовало данных сквозного бурения гидролакколитов, и сведения по внутреннему строению и питанию ледяных ядер базировались на анализе проб наледных источников (Orvin, 1944; Liestol, 1977; Yoshikawa, Harada, 1995; Hodson et al., 2019; Hodson et al., 2020), отдельных геофизических зондирований (Ross et al., 2005; Rossi et al., 2018) и единичных наблюдений льда в эрозионных формах (Втюрин, 1989; Yoshikawa, 1993).

Объект исследования

работы бугры Объект исследования данной многолетние пучения (гидролакколиты) архипелага Шпицберген. Большая часть гидролакколитов располагается на арктических низменностях с развитием сплошной и прерывистой мерзлоты (Grosse, Jones, 2011), отмечается они также в долинах и на плато охваченных мерзлотой горных регионов, в том числе арх. Шпицберген. В научной литературе многолетние бугры пучения имеют разные названия. В русскоязычных работах используются термины булгуннях, многолетний бугор пучения и гидролакколит. Первый, якутский термин, исторически использовался по отношению к любому изолированному холму на местности (Толстихин, 1941), второй характеризует форму и динамику, а третий, предложенный Н.И. Толстихиным (1932), указывает одновременно на генезис этой формы рельефа. В настоящее время существуют варианты деления терминов в зависимости от механизма формам, льдообразования. Булгунняхи относят возникшим **VCЛОВИЯХ** к в гидростатического напора, а гидролакколиты к формам, возникшим в условиях гидравлического напора (Втюрина Е.А., 1984). В англоязычной литературе принят предложенный Альфом Порсильдом (Porsild, 1938) термин pingo, эскимосского происхождения, который характеризует прежде всего форму (French, 2007), и объемлет

оба типа многолетних бугров пучения. В настоящей работе для обозначения изолированных холмов с наличием ледяного ядра либо его признаков как синонимы используются термины многолетний бугор пучения и гидролакколит. Последний термин принимается в изначальном понимании автора (Толстихин, 1941) без непосредственной привязки к типу льдообразования, аналогично термину пинго. В ходе наших исследований была обнаружена морфологическая и генетическая связь многолетних бугров пучения Шпицбергена с локальными поднятиями (далее - платформы), образованными площадным пучением над ледяными телами. Ранее данная связь и само наличие площадных пучений на Шпицбергене были не известны.

В данной работе из анализа исключены однолетние гидролакколиты или frost blisters (сезонные бугры пучения) ввиду чрезвычайной динамичности этих форм, невозможности оценки палеообстановок их формирования, привязки исключительно к деятельному слою, отсутствия связи с глубинными таликами, невозможности сравнивать их характеристики средствами аэрогеодезии. Из анализа также исключаются миграционные бугры пучения, как торфяные - palsa (Pissart, 1985, Seppälä, 1988; Васильчук и др., 2008; Vasil'chuk et al., 2011), так и грунтовые - lithalsa (Pissart, 2002). Их изучение на Шпицбергене представляет собой отдельную научную проблему, выходящую за рамки настоящей работы.

Предмет исследования

Предметом исследования являлись морфология, географическое распределение, внутреннее строение, источники питания и современная динамика гидролакколитов арх. Шпицберген.

Цель, задачи и методика исследования

<u>Цель</u> данной работы – реконструкция условий и механизмов формирования, а также современной динамики многолетних бугров пучения (гидролакколитов) архипелага Шпицберген. Для достижения поставленной цели необходимо было выполнить задачи:

1. <u>Выявление источников питания гидролакколитов.</u> Для этого химический и изотопный состав питающих вод определялся по характеристикам льда из буровых кернов, а также путем анализа проб воды из круглогодичных (наледных) источников, обнаруженных в основании нескольких гидролакколитов в долинах Грендален и Рейндален (Demidov et al., 2019, 2021, 2022). Дополнительно отбирались пробы воды из поверхностных водотоков, наледных источников, не связанных с гидролакколитами, и наледных источников во фронтальных зонах ледников в западной части Земли Норденшельда (Демидов и др., 2020).

2. <u>Анализ морфологии, географического распределения и современной динамики</u> <u>гидролакколитов.</u> Проведен на основе цифровой модели рельефа S0 Terrengmodel Svalbard DEM model (2014) Норвежского полярного института (https://toposvalbard.npolar.no) с привлечением аэрофотоснимков 1936-1938 гг., 1990 г., 2008-2012 гг. (Hopвежский полярный институт), спутниковых снимков (Landsat), геологических карт масштаба 1:100 000 (Норвежский полярный институт, AO «Полярная морская геологоразведочная экспедиция») и собственных наблюдений автора в экспедициях 2017-2023 гг. Проведено геологическое и геоморфологическое районирование архипелага для выявления пространственных закономерностей распространения гидролакколитов.

3. <u>Выявление внутреннего строения многолетних бугров пучения</u>. Впервые была пробурена серия скважин на пяти буграх пучения в долинах Грендален и Холлендардален. Бурение сопровождалось фотодокументацией кернов, отбором образцов (на химический, изотопный, кристаллографический анализы), описанием литологического и криогенного строения (Demidov et al., 2019, 2021).

Научная новизна работы

Работа вскрывает неизвестные ранее особенности формирования гидролакколитов в арктических горах в условиях горной мерзлоты.

1. Впервые на основе цифровой модели рельефа архипелага Шпицберген проведен анализ морфологии и географического распределения гидролакколитов. Определены общее количество, высотное положение, высота бугров, диаметр, наличие наледных источников. Создана электронная база данных гидролакколитов архипелага. Установлено, что горный рельеф с его значительными превышениями и соответствующим высокими гидравлическим градиентом и более интенсивным водонапором способствует увеличению размеров гиролакколитов по сравнению с равнинными арктическими тундрами: выявлены заметно большие средние размеры многолетних бугров пучения Шпицбергена по сравнению с буграми пучения низменностей Северной Аляски и Северной Азии. Определены закономерности распределения гидролакколитов в зависимости от геологических и гидрогеологических характеристик конкретных районов архипелага.

2. Впервые установлено на основе анализа аэрофотоснимков и полевых данных наличие на Шпицбергене участков площадного пучения (платформ), связанных с образованием подземных ледяных тел;

3. Впервые на архипелаге Шпицберген многолетние бугры пучения пробурены насквозь. Установлены строение ледяных ядер, размеры и конфигурация ледяных кристаллов, изотопный и химический состав льда, температура подстилающих грунтов. Выявлен пульсирующий инъекционный характер питания по типу открытой и полуоткрытой гидравлической системы;

4. Впервые на основании обширного опробования наледных источников западной части Земли Норденшельда и сравнения полученных данных с химическим составом льда гидролакколитов и архивными материалами 1935-1989 гг. выявлены источники питания гидролакколитов. Показано, что они питаются преимущественно солоноватыми гидрокарбонатно-натриевыми водами верхних этажей подмерзлотных водоносных пластов и зон трещиноватости Западно-Шпицбергенского криоадартезианского бассейна. Также впервые установлена возможность питания гидролакколитов, расположенных в низовьях долин, солеными хлоридно-натриевыми водами.

5. Выявлена динамика развития гидролакколитов в соответствии с климатическими изменениями: обнаружены периоды их массового образования, отмирания и образования новых форм при смене ландшафтно-климатических обстановок. Описан механизм возникновения гидролакколитов в последние десятилетия в условиях потепления климата и выявлены соответствующие молодые формы на моренах отступающих ледников.

Степень достоверности

Достоверность полученных результатов определяется большим объёмом натурного материала, собранного в ходе полевых работ и при дистанционном изучении объектов исследования, наличием комплексных данных лабораторных анализов кернов льда и мерзлых отложений, полученных в ходе бурения, а также результатов гидрохимического анализа проб подземных вод. Данные дистанционного зондирования верифицировались полевыми наблюдениями. Внимательно изучались материалы предшественников.

Основные защищаемые положения

1. Главные факторы формирования гидролакколитов Шпицбергена - сохранение в сплошной мерзлоте таликов и водопроводящих зон трещиноватости, обусловленных тектоникой, а также наличие обусловленного горным рельефом гидравлического напора в питающих подмерзлотных водоносных горизонтах. Сочетание данных условий наиболее

характерно для центральных частей архипелага, где располагается наибольшее число гидролакколитов, тогда как длительно промороженные низкогорные пространства Северо-Восточной Земли, а также районы распространения карстующихся водопроницаемых карбонатных пород карбона и перми, полностью свободны от этих форм.

2. Преобладающий источник питания бугров пучения Земли Норденшельда, в пределах которой сосредоточено наибольшее количество гидролакколитов всего архипелага, – солоноватые гидрокарбонатно-натриевые воды верхних этажей подмерзлотных водоносных пластов и зон трещиноватости Западно-Шпицбергенского криоадартезианского бассейна (главным образом – палеогенового водоносного комплекса и частично – верхней части нижнемелового водоносного комплекса). В низовьях речных долин гидролакколиты также питаются хлоридно-натриевыми водами.

3. Все 136 гидролакколитов архипелага Шпицберген относятся к открытому (гидравлическому) типу и их средние размеры превышают размеры гидролакколитов закрытого типа Северной Аляски и Северной Азии, что объясняется значительным гидравлическим градиентом в горизонтах подземных вод в условиях горного рельефа. Большая часть гидролакколитов архипелага сейчас проморожена и не имеет таликов в основании. Их рост остановился не позднее 1936-1938 гг. В настоящее время условия для гидролакколитов формирования новых сохраняются, в первую очередь. на освобождающихся в результате потепления климата из-подо льда моренах горнодолинных ледников, где обнаружено пять новых форм, сформировавшихся после завершения малого ледникового периода (в том числе после 1938 г.).

4. На архипелаге, помимо собственно гидролакколитов, существуют также переходные формы рельефа - участки площадного пучения (платформы), которые могут указывать на наличие подземных залежей льда, не выраженных на поверхности как классические точечные бугры пучения.

Теоретическая и практическая значимости работы

Одними из самых важных исследованных закономерностей географического распределения и морфологии гидролакколитов открытого типа на архипелаге Шпицберген являются:

- наличие пучений в скальных грунтах в средних и верхних частях долин горных районов;

- значительная доля несферических форм и участков площадного пучения (платформ);

- превышение средних размеров горных гидролакколитов открытого типа над равнинными гидролакколитами закрытого типа.

Данные критерии применимы при классификации и определении генезиса гидролакколитов других районов, включая обнаруженных на других планетах.

Выявление участков современного развития гидролакколитов позволяет прогнозировать появление новых многолетних бугров пучения на освобождающихся в результате таяния ледников моренах Шпицбергена и других горных районов Арктики (в первую очередь Гренландии). Наиболее благоприятными следует признать те участки, где располагаются активные геологические разломы. Это важно с точки зрения своевременной организации дальнейших исследований и наблюдений за динамикой роста гидролакколитов открытого типа от момента зарождения формы до ее стабилизации.

Выясненные состав и генезис подземных вод, питающих гидролакколиты западной части Земли Норденшельда, пополняя достаточно ограниченные сведения по гидрогеологии Шпицбергена, могут служить для реконструкции гидрогеологического строения без организации бурения при дальнейших исследованиях состава наледных

источников гидролакколитов в других районах архипелага и способствовать поиску источников водоснабжения поселков и шахт.

Выявленные формы площадного пучения (платформы) - новый объект для геофизического зондирования, поиска и опробования сопутствующих наледных источников. Эти формы могут в условиях потепления климата подвергаться подтверждают полевые термокарстовым процессам, ЧТО данные и сравнение аэрофотоснимков разных лет (долины Холлендардален И Броммельдален). Морфологические критерии определения этих форм могут быть использованы при изучении и картировании рельефа в других горных районах с развитием многолетнемерзлых пород, в том числе на Марсе.

Личный вклад автора

Автор ежегодно участвовал в полевых работах в составе Российской научной арктической экспедиции на арх. Шпицберген с 2017 по 2024 гг., в том числе в бурении гидролакколитов и четвертичных осадков в районе п. Баренцбург. Вел описание кернов, отбор образцов льда и грунта на лабораторные анализы. В ходе маршрутных полевых работ в весенний, летний и осенний сезоны проводил мониторинг криогенных процессов, отбор проб воды из наледных источников и поверхностных водотоков. В ходе камеральных работ осуществил дешифрирование аэро- и космоснимков с целью полного картирования гидролакколитов и их морфологической классификации; создал и разместил в международном депозитарии базу данных гидролакколитов Шпицбергена. Автором лично выполнены все стадии обработки полевых материалов, в том числе подготовка, сдача в печать и редакционная работа над рукописями статей.

Апробация

Результаты и выводы работ представлены на научных конференциях: World Congress on Geology & Earth Science Oct 04-05, 2021, «Pingo drilling reveals sodium– chloride-dominated massive ice in Grøndalen, Spitsbergen»; Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-запада России. 8-я ежегодная международная конференция по результатам экспедиционных исследований. 16-17 декабря 2021 г. Санкт-Петербург, «Морфология и географическое распределение многолетних бугров пучения (гидролакколитов) на архипелаге Шпицберген»; Международная научно-деловая конференция POLAR-2024, 16 мая 2024 г, «Гидролакколиты архипелага Шпицберген». Также результаты обсуждались на заседании лаборатории геоморфологии ИГРАН, научном семинаре ФГБУ «ВНИИОкеангеология» и представлялись на кафедре криолитологии и гляциологии географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Публикации

По теме диссертации опубликовано девять работ, среди которых шесть за первым авторством, из них две в иностранных журналах 1-го квартиля, одна в иностранном журнале 2 квартиля, одна база данных в международном депозитарии, и одни тезисы в сборниках материалов конференций.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, четырех приложений и списка литературы (203 наименования, из которых 140 на иностранных языках). Основной текст изложен на 138 страницах, содержит 40 рисунков и 4 таблицы.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю к.г.н. Фёдору Александровичу Романенко (МГУ им. М.В. Ломоносова, кафедра геоморфологии и палеогеографии) за неоценимую помощь в подготовке диссертации и предшествующей дипломной работы; своему брату и начальнику отряда мерзлотоведения РАЭШ к.г.н. Никите Эдуардовичу Демидову за ценные идеи в исследовании Шпицбергена и руководство буровыми работами; начальнику Отдела географии полярных стран Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) д.г.н. Сергею Романовичу Веркуличу за руководство и моральную поддержку; геологам ФГБУ «ВНИИОкеангеология» Владимиру Викторовичу Шарину, Александру Николаевичу Сироткину, Алексею Сергеевичу Окуневу и Евгению Анатольевичу Гусеву за высказанные замечания и комментарии к содержанию работы; своим постоянным напарникам в летний сезон научным сотрудникам ААНИИ к.г.н. Ульяне Вячеславовне Прохоровой, Антону Викторовичу Терехову и Диане Александровне Соловьевой за дружную совместную работу; работнику ГРОЗ шахты п. Баренцбург Александру Алексеевичу Яцуненко и бортмеханику авиаотряда п. Баренцбург Евгению Валерьевичу Минину за содействие в полевых маршрутах. Наконец, автор благодарит весь коллектив Отдела географии полярных стран ААНИИ и работников РАЭШ за огромное удовольствие от совместной работы и помощь в исследованиях.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Природные условия и факторы формирования гидролакколитов на Шпицбергене

В главе приводятся основные сведения о природе архипелага, описаны состав островов архипелага, растительность, гидрография. Наибольшее внимание уделено факторам, влияющим на образование и динамику гидролакколитов. Изложены основные характеристики геологического строения (Лившиц, 1973; Geoscience Atlas..., 2019), в том числе рассмотрено распространение четвертичных отложений (Семевский, Шкатов, 1965; Лаврушин, 1969; Шарин и др., 2003; Шарин, 2004; Кокин, 2010; Gilbert, 2018).

Подробно описан рельеф архипелага, при этом особое внимание уделено криогенным формам и процессам. В основе описаний лежат исследований автора настоящей диссертации (Демидов, Демидов, 2019). По материалам норвежских ученых составлена сводка по динамике опасных процессов: селей, водоснежных потоков, лавин, оползней (Jonsson, Gauer, 2014; Hestnes et al., 2016; Hanssen-Bauer et. al., 2019; Christiansen et al., 2019).

Современные климатические условия приведены по сводной работе (Hanssen-Bauer et al., 2019). В целом климат Шпицбергена оказывается благоприятным для развития оледенения благодаря сочетанию низких температур, характерных для высоких широт Арктики, и большому количеству осадков. Центральная часть о. Шпицберген получает примерно вдвое меньше осадков, чем периферия (исключая северную). Это обстоятельство в сочетании с более высокими температурами в сезон абляции предопределяет исключительно горный характер оледенения в центральной части (Троицкий и др., 1975). Наличие в этой области большого числа практически полностью свободных ото льда долин - поле для широкого развития криогенных процессов, в том числе образования гидролакколитов.

Истории оледенения Шпицбергена посвящено несколько сотен публикаций (обзор Farnsworth et al., 2020). Наибольшего распространения ледниковые покровы достигали 24 тысячи л.н., когда весь или практически весь архипелаг был покрыт льдом, и современные троговые долины и фьорды служили путями движения и разгрузки льда в сторону шельфа. В этот период в долинах были практически полностью уничтожены доледниковые формы рельефа и соответствующие им четвертичные осадки, а также следы предшествующих оледенений (Landvik et al., 2014).

Дегляциация Шпицбергена началась около 15-14 тысяч л.н., и 12-10,5 тысяч л.н. внутренние фьорды и долины практически полностью освободились от льда (Farnsworth et al., 2020). В период с 10 до 4,5 тысяч л.н. площади ледников Шпицбергена были значительно меньше современных, и некоторые ледники, особенно в западной части архипелага, исчезали полностью; всего 25% архипелага были покрыты льдом по сравнению с современными 60% (Svendsen, Mangerud, 1997; Mangerud, Svendsen 2017; Farnsworth et al., 2020). Активизация ледников началась после 4 тысячи л.н. Значительные подвижки наблюдались 2,5 тысячи л.н., а максимального распространения в голоцене ледники Шпицбергена достигли в т.н. малом ледниковом периоде - 14-19 веках н.э. Начавшееся в 1920-х годах потепление привело к отступанию ледников и появлению общирных участков в долинах, покрытых молодыми моренами.

В связи с важностью вопроса о питании гидролакколитов подземными водами в главе 1 приведены данные предшественников, суммируя которые, можно заключить, что общим для всех дочетвертичных (в основном подмерзлотных) водоносных комплексов, выделенных А.В. Курковым и Я.В. Неизвестновым (1983), является их приуроченность к разломам и зонам трещиноватости, что может проявляться в сложной пространственной конфигурации водоносных горизонтов подземных вод разного типа и состава. Общим

также является наличие хлоридно-натриевых вод в нижних этажах (ниже уровня моря), тогда как напорные (разгружающиеся) воды верхних этажей могут быть разного химического состава, с частым появлением слабосолоноватых и солоноватых гидрокарбонатно-натриевых вод.

Глава 2. Методика исследования

При исследовании пространственного распределения И морфологии гидролакколитов архипелага Шпицберген была подготовлена их полная база данных с указанием для каждого количественных и качественных характеристик. Гидролакколиты выявлялись на аэрофотоснимках и спутниковых снимках высокого разрешения, которые находятся в открытом доступе на онлайн-ресурсе TopoSvalbard (Норвежский полярный https://toposvalbard.npolar.no). Часть гидролакколитов институт: отмечена на топографических картах TopoSvalbard. Кроме того, использовались спутниковые снимки высокого разрешения Landsat на весь архипелаг, доступные на ресурсах Геологической службы США (USGS; https://earthexplorer.usgs.gov) и в онлайн базе данных Zoom Earth (https://zoom.earth). Высотное положение гидролакколитов, их морфология, растительный покров, наличие кратеров и расстояние до ледников анализировались с использованием цифровой модели рельефа Шпицбергена S0 Terrengmodel Svalbard с разрешением 2-5 м (Terrengmodell Svalbard, 2014) и соответствующего ортофотоплана. Расположение гидролакколита относительно местного уровня голоценовой трансгрессии определялось путем сравнения высот основания гидролакколита с картой изобаз Bondevik et al. (1995), а в долине Грёндален – с данными В.В. Шарина и др. (2014). Геологическая привязка осуществлялась по геологической карте масштаба 1:250000 (Geoscience Atlas of Svalbard, 2019, стр. 142-168), карте тектонических провинций масштаба 1:2000000 (Geoscience Atlas of Svalbard, 2019, стр. 181) и карте типов горных пород масштаба 1:2000000 (Geoscience Atlas of Svalbard, 2019, стр. 139). Современная динамика гидролакколитов выявлена путем сравнения аэрофотоснимков 1936-1938 годов (доступных в цифровом формате на ресурсе TopoSvalbard) с аэрофотоснимками 1990 и 2008-2012 годов.

Полевые наблюдения, буровые работы и отбор проб наледных источников проводились в сезоны 2017-2020 гг. на гидролакколитах долины Грёндален (бурение четырех гидролакколитов), в сезоны 2019-2021 в долине Холлендардален (рекогносцировка и отбор проб льда в термоцирке в долине Холлендардален), в апрелемае 2020 на гидролакколитах и наледях долин Берзелиусдален, Аурдален, Вассдален и Рейндален (рекогносцировки и отбор проб воды наледных источников), в августе 2021 г. в долинах Линнея, Крокдален и вокруг пос. Пирамида (рекогносцировки и отбор проб воды поверхностных водотоков).

осуществлялось малогабаритной установкой УКБ-12/25 Бурение (000)"Машиностроительный завод им. В.В. Воровского", Екатеринбург, Россия) «всухую», без промывки и продувки, с сохранением мерзлого состояния кернов. Максимальная глубина м. Образцы льда из кернов отбирались на гидрохимический, скважин 25 кристаллографический и изотопный анализы и перевозились в мерзлом состоянии.

лаборатории В химико-аналитической Российской арктической научной экспедиции на архипелаге Шпицберген (РАЭ-Ш) в Баренцбурге проводился химический анализ льда и воды, в образцах мерзлых пород определяли весовую влажность и химический состав водной вытяжки. Анализ льда и воды на изотопы δ^{18} O and δ D проведен в лаборатории изменений климата и окружающей среды (ЛИКОС) Арктического и антарктического научно-исследовательского (Санкт-Петербург) института A.A. Екайкиным, А.Н. Верес, А.В. Козачек.

Кристаллографический анализ проведен геологическим факультетом МГУ им. М.В. Ломоносова (В.И. Гагарин). В лаборатории Института им. Альфреда Вегенера (г. Потсдам, Германия) проведены гранулометрические анализы с использованием лазернодифракционного анализатора размера частиц Malvern Mastersizer 3000 (Великобритания). Для измерения температуры в скважинах использовались термокосы Geo Precision (Германия) и термокосы ООО «МГУ-Геофизика» (Россия).

Результаты анализов классифицировались и сравнивались с данными ведомственных инженерно-геологическими и гидрогеологическими отчетами 1935–1989 гг. из фондов Шпицбергенской партии АО «ПМГРЭ» в Баренцбурге (Российские..., 1998), а также с опубликованными данными (Обидин, 1958; Курков, Неизвестнов, 1983; Втюрин, 1989, 1990).

Глава 3. Гидрохимический состав наледных источников, поверхностных водотоков, шахтных вод западной части Земли Норденшельда

В главе на основе собственных аналитических данных (Demidov et al., 2019; Демидов и др. 2020; Demidov et al., 2021) и данных предшественников создана классификация подземных вод западной части Земли Норденшельда, в которой сосредоточена значительная доля гидролакколитов архипелага (Рис. 1). Выделены следующие типы подземных вод:

1. Воды сезонно-талого слоя четвертичных отложений

2. Воды надмерзлотных таликов

3. Воды долинных наледей неглубокого стока

4. Криопэги

5. Трещинно-жильные глубинные воды водоносного комплекса нижнего мела

6. Карстовые сульфатные межмерзлотные воды каменноугольного и пермского водоносных комплексов

7. Воды приледниковых наледей

8. Воды глубокого стока верхнего этажа палеогеновых образований



Рис. 1. Картосхема состава подземных и поверхностных вод 2019-2021 гг. Цифрами обозначены номера проб в Приложении 2 диссертации.

Глава 4. Распространение и морфология гидролакколитов

В результате анализа аэрофотоснимков и спутниковых изображений на архипелаге Шпицберген было обнаружено 136 гидролакколитов (рис. 2), перечень и характеристики которых доступны в базе данных PANGAEA (Demidov, 2022). Гидролакколиты находятся на абсолютных высотах от 0 до 201 м над уровнем моря, с медианной высотой основания бугра 42 м над уровнем моря. Выше уровня голоценовой трансгрессии расположены 44 гидролакколита, и 92 расположены ниже (рис. 3). Выявлено наличие в долинах питающих разломов, по которым происходит подъем к поверхности подмерзлотных подземных вод различного химического состава. Данное обстоятельство характеризует многолетние бугры пучения в долинах Шпицбергена как гидролакколиты открытой системы. Геоморфологических условий для образования гидролакколитов с закрытой системой на архипелаге не обнаружено.



Рис. 2. Гидролакколиты арх. Шпицберген и их расположение относительно максимального уровня голоценовой трансгрессии и выделенных геолого-геоморфологических провинций (обозначены цифрами соответственно нумерации в таблице 1). Красные точки - гидролакколиты, сформировавшиеся выше уровня трансгрессии, синие точки - гидролакколиты, сформировавшиеся ниже уровня трансгрессии. Максимальный уровень голоценовой трансгрессии (м абс) показан изобазами, проведенными согласно с высотным уровнем морских террас 10 тыс. л.н. (по схеме Bondevik et. al., 1995). Красные линии отмечают подтвержденные и предполагаемые разломы по геологическим картам масштаба 1:100 000 (Dallmann et al, 1993; Geoscience Atlas of Svalbard, 2019 и Демидов и др., 2020).



Рис. 3. Распределение гидролакколитов Шпицбергена по высотам основания бугра над современным уровнем моря

Гидролакколиты Шпицбергена, максимальные и средние высоты которых достигают 40 и 9,4 м соответственно, заметно выше гидролакколитов Северной Аляски (*Jones et.al*, 2020) - 21 и 4,6 м, и Северной Азии (*Grosse, Jones, 2011*) - 37 и 4,8 м.

Возраст и состав горных пород, тектоническое положение, выраженность в рельефе и наличие/отсутствие оледенения позволили выделить несколько крупных геолого-геоморфологических провинций, отличающихся количеством и плотностью расположения гидролакколитов (табл. 1).

Автором впервые обнаружены на архипелаге, помимо собственно гидролакколитов, переходные формы рельефа (площадные поднятия - платформы), которые могут указывать на наличие подземных залежей льда, не выраженных на поверхности в виде классических точечных бугров пучения (рис. 4, 5). Наличие льда в таких формах подтверждено серией геофизических и геоморфологических исследований (Piper, Porritt, 1966; Ross et al., 2005; Демидов, Демидов, 2019). Площадные залежи подземного льда, обнаруженные автором в термоцирке долины Холлендардален, имеют сегрегационный генезис с присутствием сильного обводнения осадков в момент образования, и, возможно, по типу сходны с подземными льдами Новой Земли (Leibman et al., 2005; Demidov et al., 2024).

Провин- ция	Геология	Рельеф	Ледники	Подземные воды	Гидро- лакколиты
la Западная	Складчатый фундамент метаморфических пород докембрия-силура в пределах третичного складчато- надвигового пояса Шпицбергена (Dallman et al., 1993) и Северо-Западного поднятия (Geoscience Atlas, 2019). Узкая полоса в прибрежной части о. Западный Шпицберген.	Альпинотипный низкогорный рельеф с остроконечными горными вершинами (карлингами).	Горно-долинное и сетчатое оледенение. В северной части практически нет свободных от ледников долин, в южной части троговые долины в основном свободны от льда.	Трещинно- жильные слабосолоноватые и солоноватые хлоридно- натриевые и гидрокарбонатно- натриевые воды.	Редки
1б Северо- восточная	Складчатый фундамент метаморфических и магматических пород докембрия-силура в пределах Восточного поднятия (<i>Geoscience Atlas, 2019</i>). Занимает полуостров Нью-	Сглаженный средне и низкогорный рельеф (с участками пологохолмистых равнин на Северо-	Обширное сетчатое и полупокровное оледенение. Долины Нью-Фрисланда заняты выводными языками ледников. На Северо- Восточной Земле	Трещинно- жильные воды, не изученные бурением и опробованием.	Отсутствуют

Табл. 1. Геолого-геоморфологическое районирование Шпицбергена

	Фрисланд и о. Северо- Восточная Земля.	Восточной Земле)	значительные площади приморских равнин свободны ото льда.		
2 Земля Андре	Блок девонских терригенных осадочных пород (песчаники, алевролиты, аргиллиты) субмеридионального грабена Земли Андре (<i>Ливиии, 1973;</i> <i>Geoscience Atlas, 2019</i>).	Сглаженный средне и низкогорный рельеф	Относительно небольшие горно- долинные и переметные ледники. Троговые долины в основном свободны ото льда.	Пластово- трещинно- жильные солоноватые хлоридно- натриевые воды.	Многочисленны
3 Темпель- фьорд	Верхнепалеозойский платформенный чехол (Лившиц, 1973) пермо- карбоновых морских карбонатных осадочных пород (известняки, гипсы, ангидриты, кремнистые сланцы). Система поднятий и опусканий с наибольшими свободными от ледникового покрова площадями к северу от залива Исфьорд (Земля Диксон, Земля Бюнсов, Земля Сабины).	Платообразный низкогорный рельеф с отвесными (по бронирующим пластам) горными склонами и карстом (Geoscience Atlas, 2019).	Площади горно- долинного и сетчатого оледенения в этой области незначительны. Троговые долины свободны ото льда.	Порово- трещинно- карстово- пластовые воды, пресные и солоноватые хлоридно- натриевые.	Отсутствуют
4 Восточная	Мезозойский платформенный чехол (Лившиц, 1973), образованный мезозойскими (триас-юра) терригенными и морскими осадочными породами (песчаниками, алевролитами, аргиллитами, битуминозными сланцами). Занимает южную часть о. Северо-Восточная Земля, о. Баренца, о. Эдж, восток о. Западный Шпицберген (Geoscience Atlas, 2019).	Платообразный низкогорный рельеф.	Оледенение горно- долинное, сетчатое и полупокровное. Наибольшие свободные ото льда участки приурочены к долинам и приморским равнинам о. Баренца и о. Эдж.	Трещинно- жильные соленые хлоридно- натриевые воды.	Многочисленны в высокогорных районах о. Зап. Шпицберген и редки на средневысотном о. Эдж.
5 Централь- ная	Мел-палеогеновый платформенный чехол (Ливииц, 1973) - Центральный Третичный бассейн (Западно- Шпицбергенский грабенообразный прогиб). Занимает центральную и южную часть о. Западный Шпицберген и окружен в краевых частях мезозойскими и пермо-карбоновыми осадками. Распространены терригенные осадочные породы (песчаники, алевролиты, аргиллиты) с прослоями утлей; в нижнем ярусе меловые (Geoscience Atlas, 2019).	Платообразный низкогорный рельеф.	Чрезвычайно слабое развитие современного оледенения в северной части бассейна (Земля Норденшельда). Развиты небольшие по размерам ледники в основном долинного типа. В связи с этим район характеризуется хорошо развитой речной сетью, что в общем нехарактерно для Шпицбергена (<i>Семевский, Шкатов,</i> 1965).	Трещинно- жильные воды. В нижних этажах (меловые ярусы) соленые хлоридно- натриевые; в верхних этажах (палеогеновые ярусы) пресные, слабосолоноватые гидрокарбонатно- натриевые.	Многочисленны



Рис. 4. Платформенные поднятия в долине Bromelldalen у подножия г. Sven Nilssonfjellet (аэрофотоснимки и космоснимки Норвежского полярного института): (а) южная платформа на аэрофотоснимке 2011 г. с термокарстовым провалом, образовавшимся после 1990 г. (b) южная платформа на космоснимке за апрель 2016 с крупной наледью; (c) северная платформа на аэрофотоснимке 2011 с небольшими термоцирками на южной оконечности формы; (d) северная платформа на космоснимке за апрель 2016 с крупной наледью.



Рис. 5. Платформенные поднятия, отдельно стоящие и сопряженные с гидролакколитами (аэрофотоснимки Норвежского полярного института 2009-2011 гг.): (а) гидролакколит Innerhytte pingo в долине Адвентдален и примыкающая платформа высотой 10 м с термокарстовыми понижениями; (b) пологонаклонная платформа в долине Eskerdalen высотой от 3 до 30 м с термоцирками по склонам; (c) платформенный пьедестал высотой 5-10 м вокруг гидролакколита в долине Purpurdalen; (d) платформагидролакколит высотой до 10 м в долине Vendomdalen; (e) терассовидная платформа высотой 4 м,

Глава 5. Внутреннее строение гидролакколитов долины Грендален

Участок буровых работ находится в долине Грендален в западной части Земли Норденшельда в 10 км к юго-востоку от пос. Баренцбург, где на абсолютных высотах 13-60 м расположена группа из пяти крупных гидролакколитов диаметром 180-300 м и высотой над окружающей местностью 10-12,5 м, а также несколько менее крупных гидролакколитов. В ходе исследования они получили названия в честь гномов скандинавских саг и повести Джона Р. Р. Толкиена "Хоббит": Нори, Фили, Кили, Оин, Глоин (Demidov et al., 2019).

В 2017-2020 гг. для изучения внутреннего строения и условий формирования гидролакколитов в долине Грендален было пробурено 11 скважин: № 8, 9, 10, 11, 13, 15, 16, 17, 18, 19 (Рис. 6). Тремя сважинами были вскрыты ледяные ядра гидролакколитов (рис. 7). Одной (скважина №8) - краевая часть гидролакколита.



Рис. 6. Район буровых работ РАЭ-Ш 2017-2020 гг. и гидролакколиты долины Грендален. 3d модель (вверху изображения) по Демидов и др. (2020), карта (внизу изображения) по топооснове TopoSvalbard.npolar.no.



Рис. 7. Строение трех гидролакколитов в средней части долины Грендален по результатам бурения 2017-2019 гг. (фото А.И. Кизякова)

Бурение показало, что ядра крупных сферических бугров - объемные монолитные ледяные тела мощностью до 15-20 м. Подстилающие их осадки проморожены (температуры в пределах 2,5 – 2,8 °C ниже нуля), что объясняет отсутствие изменений в морфологии большей части гидролакколитов Шпицбергена за период 1936-2012 гг. Изотопный и химический состав льда характерен для гидролакколитов открытой системы. Источником питания служили гидрокарбонатно-натриевые и хлоридно-натриевые подмерзлотные воды, имевшие гидравлический напор.

Заключение

В работе проведено комплексное исследование гидролакколитов Шпицбергена – специфического географического объекта, аналогов которому в мире очень немного. Создана полная база данных гидролакколитов, включающая их местоположение, морфологические характеристики и ряд наиболее важных признаков - наличие и состав наледных источников, наличие или отсутствие растительного покрова и др. Выявлены ранее неизвестные географические закономерности формирования рельефа в арктических горах в условиях горной мерзлоты и характерные детали жизни гидролакколитов Шпицбергена.

По спутниковым и аэрофотоснимкам выявлено по характерным морфологическим особенностям (пучение, дилатационные трещины, кратеры) в общей сложности 136 гидролакколитов, из которых 123 расположены на о. Западный Шпицберген, и 13 - на о. Эдж. 44 гидролакколита сформировались выше максимального уровня голоценовой трансгрессии (до 201 м над уровнем моря) и 92 ниже (в том числе в зоне волнового заплеска).

Высоты бугров от основания до вершины достигают 40 м; диаметр колеблется от 20 до 900 м. Интервал между 30 и 60 м над уровнем моря в долинах Шпицбергена наиболее благоприятен для образования гидролакколитов (51 объект).

49 (36%) гидролакколитов имеют форму полусферы; 40 (29%) представляют собой бугры сложной морфологии со множеством вершин, кратеров и лопастей, что можно объяснить блуждающим гидравлическим характером питающего водоносного талика; 23 (17%) имеют форму вытянутого овала. Остальные формы или слишком малы (14%) или эродированы настолько, что потеряли первоначальные очертания (4%).

47 (35%) гидролакколитов сформировались в дистальных частях пролювиальных и аллювиальных конусов выноса (наиболее распространенное геоморфологическое положение); 35 (26%) - на речных террасах; 27 (20%) - в пределах блуждающих русел и на поймах; 20 (15%) - в нижних частях горных склонов; 5 (4%) - на моренах малого ледникового периода; и 2 (1%) - в дельтах рек, выдвигающихся в море. Ни одного гидролакколита не было обнаружено в спущенных озерах или изолированных котловинах (что типично для гидростатических бугров пучения в Арктике). 8 (6%) гидролакколитов сформировались на склонах либо у подножия склонов северной экспозиции, а 32 (24%) - южной экспозиции. Большая часть гидролакколитов располагаются неподалеку от современных ледников (медианное расстояние - 3 км).

Установлено, что горный рельеф с его значительными превышениями и, значит, высокими гидравлическим градиентом и более интенсивным водонапором, способствует увеличению средних размеров гиролакколитов по сравнению с равнинными арктическими тундрами. Гидролакколиты Шпицбергена, максимальные и средние высоты которых достигают 40 и 9,4 м соответственно, заметно выше гидролакколитов Северной Аляски (Jones et.al, 2020) - 21 и 4,6 м, и Северной Азии (Grosse and Jones, 2011) - 37 и 4,8 м. Гидролакколиты на Шпицбергене встречаются исключительно в речных долинах горных районов, где высота гор и ледников над основанием гидролакколита превышает 270 метров. Самые крупные формы расположены в районах с самыми высокими хребтами, что также подтверждает мнение (Liestøl, 1977), о том, что многолетние бугры пучения Шпицбергена относятся к гидравлическому (открытому) типу.

Распределение гидролакколитов существенно определяется геологическими и гидрогеологическими характеристиками района. 88 (65%) гидролакколитов располагаются в пределах Центрального Третичного бассейна Шпицбергена и его крыльев в пределах мезозойского платформенного чехла (Западно-Шпицбергенского криоадартезианского бассейна), 17 (13%) - в пределах тектонического блока Земли Андре и 18 (13%) мезозойской платформы восточного Шпицбергена и о. Эдж. В этих тектонических провинциях преобладают осадочные породы - сланцы, алевролиты и песчаники. 13 (10%) гидролакколитов образованы в Западно-Шпицбергенской зоне разломов, где преобладают слюляные сланцы, мраморы И другие метаморфические филлиты. породы. Гидролакколиты не обнаружены в области распространения каменноугольных и пермских известняков, доломитов и гипсов. Данное обстоятельство вызвано отсутствием условий для возникновения напора подземных вод в связи с повышенной проницаемостью пород даже в условиях вечной мерзлоты. 55 (40%) гидролакколитов располагаются над линиями подтвержденных разломов (Geoscience Atlas of Svalbard, 2019; Демидов и др., 2020) основных путей питания ледяных ядер подземными водами. Также отсутствуют гидролакколиты на низкогорном и длительно промороженном острове Северо-Восточная Земля.

Гидролакколиты развиваются в соответствии с климатическими изменениями: обнаружены периоды их массового образования, консервации и новообразования при изменившихся географических условиях. Сравнение аэрофотоснимков 1936-1938 гг. с аэрофотоснимками 2008-2012 гг. показывает, что большая часть гидролакколитов не изменили своей морфологии и не проявляли активности за этот период. Только пять гидролакколитов можно надежно датировать как сформировавшиеся после 1936-1938 годов. Это гидролакколит *Riverbed-pingo* в долине Адвентдален и четыре гидролакколита, выросшие на освобождающихся ото льда моренах малого ледникового периода ледников Элизебрин и Гардебрин. Сравнение дат возникновения этих гидролакколитов с их современной морфологией показывает, что молодые гидролакколиты Шпицбергена интенсивно растут (увеличиваясь в высоту до 1 м ежегодно - Jaworski, Chutkowski, 2015) и прекращают рост либо замедляют его до незаметных величин в течение относительно короткого времени (несколько лет - первые десятки лет).

21 гидролакколит проявляет активность в форме выхода на поверхность источников подмерзлотных вод, причем все они располагаются у подножия склонов южной экспозиции. Данная особенность свидетельствует формировании 0 Шпицбергена гидролакколитов В эпоху агградации мерзлоты В долинах (предположительно происходившей в позднем голоцене), когда промерзание на склонах северной экспозиции шло опережающими темпами.

Образование термокарстовых кратеров происходит на гидролакколитах на всех абсолютных высотах без какой-либо корреляции с размером бугра. Существуют как осушенные, так и заполненные водой кратеры. Последние (11 форм), встречаются только внутри крупных гидролакколитов с высотой бугра более 12 м.

Обнаружено, что интенсивный напор в горизонтах подмерзлотных вод в условиях значительных превышений горного рельефа приводит к появлению подземных залежей льдов и приподниманию ими обширных участков поверхности (площадные пучения) с образованием характерных платформ (пьедесталов) шириной до 1 км и высотой до 15 м. Анализ аэрофотоснимков в сочетании с полевыми данными из долины Холлендардален (Демидов, Демидов, 2019; Demidov et al., 2024) и материалами предшественников (Piper, Porritt, 1966; Втюрин, 1989 Ross et al., 2005) показывает, что площадные пучения вызваны формированием подземных льдов: пластовых либо площадных интрузий И сегрегационных жил сложной формы. Данные пучения не выражены в рельефе в виде классических сферических бугров пучения. На Земле Андре на аэрофотоснимках выявлены морфологические формы, облик которых находится между классическими гидролакколитами и каменными глетчерами (rock glaciers/talus terraces).

Впервые проведенное на архипелаге Шпицберген сквозное бурение ледяных ядер гидролакколитов в долине Грендален с отбором керна и комплексным анализом структуры и состава льда показало, что ядра крупных сферических бугров представлены объемным монолитным ледяным телом мощностью в первые десятки метров. Осадки, подстилающие ядра этих гидролакколитов, проморожены (температуры в пределах 2,5 – 2,8°C ниже нуля), ледяные ядра не получают питания подземными водами, что объясняет отсутствие изменений в морфологии большей части гидролакколитов Шпицбергена за период 1936-2012 гг.

Ядра гидролакколитов испытывали неоднократные смены эпизодов закрытой и открытой системы кристаллизации льда и смены изотопного тренда вниз по разрезу, что свидетельствует о пульсирующем подтоке подземных вод в процессе формирования ядра, что характерно для гидролакколитов открытого типа (гидравлических).

В ходе бурения в долине Грендален выявлена смена состава льда вниз по долине со слабоминерализованного гидрокарбонатно-натриевого до сильноминерализованного соленого хлоридно-натриевого.

Современные наледные источники гидролакколитов в пределах Центрального Третичного бассейна и Земли Норденшельда повсеместно имеют гидрокарбонатнонатриевый состав с высокой долей хлора и отсутствием сульфатов (воды глубокого стока верхнего этажа палеогеновых образований), а близкие по составу первичнокриометаморфизованные воды должны были повсеместно на архипелаге формировать ледяные ядра гидролакколитов в начале агградации мерзлоты. Питание за счет вод подмерзлотных горизонтов (глубокого стока), имеющих гидравлический напор и в ряде случаев продолжающих разгружаться в наледных источниках, свидетельствует о формировании гидролакколитов Шпицбергена по открытому типу, с постоянным притоком из подмерзлотных горизонтов; в связи с этим можно заключить, что география и динамика появления и роста гидролакколитов на Шпицбергене определяются, в первую очередь, режимом, обводненностью и напором подземных вод глубокого стока в сочетании с наличием и характеристиками мерзлых толщ и локальных водопроводящих зон трещиноватости.

Состав выходов подмерзлотных вод (наледных источников) в основании гидролакколитов в долинах Грендален, Адвентдален, Рейндален (слабая минерализация и преобладание гидрокарбоната натрия) соответствует характеристикам подземных вод верхнего этажа (зон трещиноватости) водоносного комплекса палеогеновых образований, изученного разведочными скважинами 1930-1980 гг. (Курков, Неизвестнов, 1983). Данный тип подземных вод – преобладающий источник питания ледяных ядер гидролакколитов Земли Норденшельда, в пределах которой сосредоточено наибольшее число гидролакколитов всего архипелага.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI, BAK

Демидов В.Э., Демидов Н.Э. Криогенные процессы, явления и связанные с ними опасности в районе российского рудника Баренцбург на архипелаге Шпицберген // ГеоРиск. 2019. Т. XIII. №4. С. 48-62. https://doi.org/10.25296/1997-8669-2019-13-4-48-62

Demidov, V., Verkulich, S., Demidov, N., Schirrmeister, L., Wetterich, S., Koshurnikov, A., Gagarin, V., Ekaykin, A., Terekchov, A., Veres, A., Kozachek, A. Pingo drilling reveals sodium chloride dominated massive ice in Grøndalen, Spitsbergen // Permafrost and Periglacial Processes, 2021, Vol. 32. Is. 4. P. 572-586. DOI: 10.1002/ppp.2124

Vasiliy Demidov, Nikita Demidov, Sergey Verkulich, Sebastian Wetterich, Distribution of pingos on Svalbard, Geomorphology, Volume 412, 2022, 108326, ISSN 0169-555X, https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108326

Vasiliy Demidov, Sergey Verkulich, Aleksey Ekaykin, Anton Terekhov, Arina Veres, Anna Kozachek, Sebastian Wetterich, Diana Soloveva, Mikhail Varentsov, Kirill Barskov, Thaw slump development and other rapid permafrost disturbances in Hollendardalen Valley, Svalbard, Polar Science, 2024, 101122, ISSN 1873-9652, https://doi.org/10.1016/j.polar.2024.101122

Борисик А.Л., Демидов В.Э., Ромашова К.В., Новиков А.Л. Внутренняя дренажная сеть и характеристики подледникового стока ледника Альдегонда (о. Западный Шпицберген) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021; 67(1):67-88. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-1-67-88

Демидов, Н.Э., Борисик, А.Л., Веркулич, С.Р., Веттерих, С., Гунар, А.Ю., Демидов, В.Э., Желтенкова, Н.В., Кошурников, А.В., Михайлова, В.М., Никулина, А.Л., Новиков, А.Л., Саватюгин, Л.М., Сироткин, А.Н., Терехов, А.В., Угрюмов, Ю.В., Ширрмейстер, Л. Мерзлотно-гидрогеологические условия западной части Земли Норденшельда (арх. Шпицберген) // Геофизические процессы и биосфера. 2020. Т. 19, № 4. С. 68–93. DOI 10.21455/GPB2020.4-6

Прохорова У.В., Терехов А.В., Демидов В.Э., Веркулич С.Р., Иванов Б.В. Внутрисезонная изменчивость абляции ледника Альдегонда (Шпицберген). // Лёд и Снег. 2023; 63(2):214-224. DOI: 10.31857/S2076673423020138

Терехов, А.В., Тарасов, Г.В., Сидорова, О.Р., Демидов, В.Э., Анисимов, М.А., Веркулич, С.Р. Оценка баланса массы ледника Альдегонда (Западный Шпицберген) в 2015–2018 гг. на основе модели ArcticDEM, геодезических и гляциологических данных // Лёд и Снег. 2020. 60(2):192-200. DOI 10.31857/S2076673420020033

Терехов, А.В., Демидов, В.Э., Казаков, Э.Э., Анисимов, М.А., Веркулич, С.Р. Определение баланса массы ледника Вёринг (Западный Шпицберген) геодезическим методом, 2013-2019 годы // Криосфера Земли. 2020. т. XXIV, № 5, С. 55-63. DOI 10.21782/KZ1560-7496-2020-5(55-63)

Терехов А.В., Прохорова У.В., Борисик А.Л., Демидов В.Э., Веркулич С.Р. Изменения объема и геометрии ледника Восточный Дальфонна (Шпицберген) в 2008–2019 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022; 68(4):370-383. DOI 10.30758/0555-2648-2022-68-4-370-383

Demidov, N., Wetterich, S., Verkulich, S., Ekaykin, A., Meyer, H., Anisimov, M., Schirrmeister, L., **Demidov, V.**, Hodson, A.J. Geochemical signatures of pingo ice and its origin in Grøndalen, West Spitsbergen. // The Cryosphere, 2019. Vol. 13. P. 3155-3169

Материалы конференций

Демидов В.Э., Демидов Н.Э., Веркулич С.Р., Веттерих С. Морфология и географическое распределение многолетних бугров пучения (гидролакколитов) на архипелаге Шпицберген // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России, по. 8, 2021, рр. 68-72. doi:10.24412/2687-1092-2021-8-68-72

Vasiliy Demidov, Pingo drilling reveals sodium–chloride-dominated massive ice in Grøndalen, Spitsbergen), Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia. 2nd Edition of World Congress on GEOLOGY & EARTH SCIENCE Oct 04-05, 2021

Международные базы данных

Demidov, Vasiliy (2022): Svalbard pingo database. PANGAEA, https://doi.org/10.1594/PANGAEA.940793

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ В АВТОРЕФЕРАТЕ ЛИТЕРАТУРЫ

Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Чижова Ю.Н. Выпуклые бугры пучения многолетнемёрзлых торфяных массивов / Под редакцией действительного члена РАЕН, проф. Ю.К.Васильчука - М. :Изд-во Моск. ун-та. — 2008. — 571 с.

Васильчук, Ю.К., Буданцева, Н.А., Васильчук, А.К., Йошикава, К., Подборный, Е.Е., Чижова, Ю.Н. Изотопный состав ледяного ядра позднеголоценового булгунняха на месторождении Песцовое в долине реки Евояха. Криосфера Земли. — 2014, т. XVIII, No 4. — С. 47–58

Втюрин Б.И. Подземные льды Шпицбергена. Материалы гляциологических исследований. Хроника, обсуждения. — 1989, № 65. — С. 69-75.

Втюрин Б.И. Криогенное строение рыхлых отложений Шпицбергена // Материалы гляциологических исследований. — 1990, № 70. — С. 43–49.

Втюрина, Е.А. Гидролакколит // в кн. Гляциологический словарь. Под ред. В.М. Котлякова. Ленинград, Гидрометеоиздат. — 1984. — С. 57, 86

Демидов В.Э., Демидов Н.Э. Криогенные процессы, явления и связанные с ними опасности в районе российского рудника Баренцбург на архипелаге Шпицберген // ГеоРиск. — 2019. Том XIII, №4/2019. — С. 48-62.

Демидов, Н.Э., Борисик, А.Л., Веркулич, С.Р., Веттерих, С., Гунар, А.Ю., Демидов, В.Э., Желтенкова, Н.В., Кошурников, А.В., Михайлова, В.М., Никулина, А.Л., Новиков, А.Л., Саватюгин, Л.М., Сироткин, А.Н., Терехов, А.В., Угрюмов, Ю.В., Ширрмейстер, Л. Мерзлотно-гидрогеологические условия западной части Земли Норденшельда (арх. Шпицберген) // Геофизические процессы и биосфера. — 2020. Т. 19, № 4. — С. 68–93. DOI 10.21455/GPB2020.4-6

Кокин О.В. Рельеф и отложения краевых зон ледников Западного Шпицбергена (на примере ледников Грёнфьорд и Альдегонда). Автореф. дис. канд. геог. наук. — 2010. — 24 с.

Курков, А.В., Неизвестнов, Я.В. Водоносные комплексы архипелага Шпицберген // Гидрогеология, инженерная геология, геоморфология архипелага Шпицберген / Под ред. Я.В. Неизвестного, Д.В. Семевского. Л.: Севморгеология. — 1983. — С. 41-53.

Лаврушин Ю.А. Четвертичные отложения Шпицбергена. Наука. — 1969. — 176 с.

Лившиц Ю.Я. Палеогеновые отложения и платформенная структура Шпицбергена. Ленинград, Недра. — 1973, т. 174. — 160 с.

Обидин Н.И. Новые данные о подземных водах и вечной мерзлоте советских рудников острова Шпицберген по исследованиям 1952–1954 гг. // Тр. НИИГА. — 1958. Т. 85, вып. 9. — С. 129–140.

Российские геологические исследования на Шпицбергене 1962–1996 гг. / Под ред. А.А. Красильщикова. СПб.: ВНИИ Океанология; ПМГРЭ. — 1998. — 228 с.

Семевский, Д.В., Шкатов Е.П. Геоморфология Земли Норденшельда (Западный Шпицберген). Материалы по геологии Шпицбергена. Л. — 1965. — С. 232-240.

Соловьев П.А. Булгунняхи Центральной Якутии // Исследования вечной мерзлоты в Якутской республике. М., Издво АН СССР. — 1952, вып. 3. — С. 226–258.

Толстихин Н.И. Подземные воды Забайкалья и их гидролакколиты. Тр.КОВМ, т.1. Издво АН СССР. — 1932.

Толстихин Н.И. Подземные воды мерзлой зоны литосферы. Государственное издательство геологической литературы. Москва. — 1941. — С. 171-179.

Троицкий Л.С., Зингер Е.М., Корякин В.С., Маркин В.А., Михалев В.И. Оледенение Шпицбергена (Свальбарда). М., «Наука». — 1975. — 276 с.

Чижова Ю.Н., Васильчук Ю.К. Изотопная индикация условий образования ледяных ядер булгунняхов (пинго). Лёд и Снег. — 2018, 58(4). — С. 507-523. https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-4-507-523

Шарин В. В. Рельеф и четвертичные образования архипелага Шпицберген и прилегающего шельфа : Дис. ... канд. геогр. наук : 25.00.25 : СПб. — 2004. — 128 с. РГБ ОД, 61:05-11/70.

Шарин В.В., Гусев Е.Е., Мусатов Е.Е., Рекант П.В. Карта четвертичных образований архипелага Шпицберген и прилегающего шельфа (масштаб 1:1000 000) // Комплексные исследования природы Шпицбергена. Апатиты. — 2003. — С. 108-110.

Bondevik, S., Mangerud, J., Salvigsen, O. Postglacial sea-level history of Edgeøya and Barentsøya, eastern Svalbard. Polar Research. Bondevik, S., Mangerud, J., Salvigsen, O. Postglacial sea-level history of Edgeøya and Barentsøya, eastern Svalbard. Polar Research. 1995. 14(2), 153-180. DOI: 10.3402/polar.v14i2.6661

Burr, D. M., Tanaka, K. L., and Yoshikawa, K. Pingos on Earth and Mars, Planet. Space Sci.,

2009. 57, 541–555, https://doi.org/10.1016/j.pss.2008.11.003.

Christiansen H.H., M. Eckerstorfer, W. Farnsworth, G.L. Gilbert, H. Hancock, O. Humlum, A. Prokop, S.M. Strandand, H.B. O'Neill. The influence of ground freezing on slope stability during autumn rainstorms in the Longyearbyen area, central Svalbard. 2019

Dallmann, W.K., Andresen A., Bergh S.G., Maher H. & Ohta Y. Tertiary fold-and-thrust belt of Spitsbergen, Svalbard. NorskPolarinstitutt Meddelelser N.128, Oslo. 1993. 46 p.

Demidov, V.E., Demidov, N.E., Verkulich, S.R., Wetterich, S. Distribution of pingos on Svalbard, Geomorphology, 2022.Volume 412, 108326, ISSN 0169-555X, https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108326

Demidov, N., Wetterich, S., Verkulich, S., Ekaykin, A., Meyer, H., Anisimov, M., Schirrmeister, L., Demidov, V., Hodson, A.J.Geochemical signatures of pingo ice and its origin in Grøndalen, West Spitsbergen. The Cryosphere. 2019. 13, 3155-3169. https://doi.org/10.5194/tc-13-3155-2019.

Demidov, V., Verkulich, S., Demidov, N., Schirrmeister, L., Wetterich, S., Koshurnikov, A., Gagarin, V., Ekaykin, A., Terekchov, A., Veres, A., Kozachek, A. Pingo drillling reveals sodium chloride dominated massive ice in Grøndalen, Spitsbergen. Permafrost and Periglacial Processes. 2021. 32(4), 572-586. DOI: 10.1002/ppp.2124.

Demidov Vasiliy, Verkulich Sergey, Ekaykin Aleksey, Terekhov Anton, Veres Arina, Kozachek Anna, Wetterich Sebastian, Soloveva Diana, Varentsov Mikhail, Barskov Kirill, Thaw slump development and other rapid permafrost disturbances in Hollendardalen Valley, Svalbard,Polar Science, 2024, 101122, ISSN 1873-9652, https://doi.org/10.1016/j.polar.2024.101122

Dundas, C.M., and McEwen, A.S. An assessment of evidence for pingos on Mars using HiRISE. Icarus, 2010. 205 (1), 244–258. doi: 10.1016/j.icarus.2009.02.020.

Farnsworth, W.R., Allaart, L. et al. Holocene glacial history of Svalbard: Status, perspectivesandchallenges.Earth-ScienceReviews.2020.Vol.208.https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103249

French H. The periglacial environment. 3rd ed. Chichester: Wiley, 2007. xviii, 458 p.

Geoscience Atlas of Svalbard. 2nd edition. Technical editor Dallman W.K. Norsk Polarintsitutt, Tromso. 2019. 71-85.

Gilbert, L.G. Cryostratigraphy and sedimentology of high-Arctic fjord valleys. PhD Thesis. University of Bergen, Norway. 2018.1-28.

Grosse, G., and Jones, B.M. Spatial distribution of pingos in northern Asia. The Cryosphere. 2011. 5, 13-33. https://doi.org/10.5194/tc-5-13-2011.

Hanssen-Bauer, Inger & Førland, Eirik & Hisdal, Hege & Mayer, Stephanie & Sandø, Anne & Sorteberg, Asgeir & Adakudlu, Muralidhar & Andresen, J & Bakke, Jostein & Beldring, Stein & Benestad, R. & van der Bilt, Willem & Bogen, Jim & Borstad, Chris & Breili, Kristian & Breivik, Oyvind & Børsheim, K & Christiansen, Hanne & Dobler, A. & Wong, W. Climate in Svalbard 2100 - a knowledge base for climate adaptation. 2019. 10.13140/RG.2.2.10183.75687.

Hestnes E., Bakkehoi S., Jaedicke C. Longyearbyen, Svalbard - vulnerability and risk management of an Arctic settlement under changing climate - a challenge to authorities and experts. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Breckenridge, USA, 2016. 363-370.

Hodson A.J., Nowak A., Redeker K.R., Holmlund E.S., Christiansen H.H., Turchyn A.V. Seasonal dynamics of methane and carbon dioxide evasion from an open system pingo: Lagoon pingo, Svalbard. Front. Earth Sci. 2019. 7(30), 1-12. https://doi.org/10.3389/feart.2019.00030.

Hodson, A., Nowak, A., Senger, K., Redeker, K. R., Christiansen, H. H., Jessen, S., Hornum, M. T., Betlem, P., Thornton, S., Turchyn, A. V., Olaussen, S., Marca, A. Open system pingos as hotspots for sub-permafrost methane emission in Svalbard. The Cryosphere, 2020. 14, 3829-3842. https://doi.org/10.5194/tc-14-3829-2020.

Holmes, G. W., Hopkins, D. M., and Foster, H.: Pingos in Central Alaska, US Geological Survey Bulletin, 1241-H, Washington, H1–H40, 1968

Humlum, O., Instanes, A., Sollid, J.L. Permafrost in Svalbard: a review of research history, climatic background and engineering challenges. Polar research. 2003. 22(2). 191-215.

Jaworski, T., Chutkowski, K. Genesis, morphology and distribution of cryogenic mounds on Kaffiøyra and Hermansenøya, Northwest Svalbard. Permafrost and Periglacial Processes, 2015. 26, 304-320. DOI: 10.1002/ppp.1850.

Jones, B.M., Grosse, G., Hinkel, K.M., Arp, C.D., Walker, S., Beck, R.A., Galloway, J.P. Assessment of pingo distribution and morphometry using an IfSAR derived DSM, western Arctic Coastal Plain, northern Alaska, Geomorphology. 2012. 138, 1-14. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.08.007.

Landvik, J.Y., Alexanderson, H., Henriksen, M., Ingólfsson, O. Landscape imprints of changing glacial regimes during ice-sheet build-up and decay: a conceptual model from Svalbard. Quaternary Science Reviews, 2014. Volume 92. 258-268. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.11.023.

Liestøl, O. Pingos, springs, and permafrost in Spitsbergen. Norsk Polarinstitutt Årbok 1975, 1977. 7-29.

Leibman M.O., Arkhipov S.M., Perednya D.D., Savvichev A.S., Vanstein B.G., Hubberten H.-W. Geo \Box chemical properties of the water–snow–ice com \Box plexes in the area of Shokalsky glacier, Novaya Zem \Box lya, in relation to tabular groundice formation // Annals of Glaciology 2005 V42 P 249–254 doi: 103189/172756405781812952

Mackay, J. R. Pingos of the Tuktoyaktuk Peninsula area, Northwest Territories. Géographie physique et quaternaire, 1979. 33, 3–61

Mangerud, J., Svendsen, J.I. The Holocene Thermal Maximum around Svalbard, Arctic North Atlantic;molluscs show early and exceptional warmth. The Holocene. 2017. 28(1), 1-19. DOI:10.1177/0959683617715701.

Müller, F. Observation on pingos. From Meddelelser om Grønland. Vol. 153, NO. 3, 127 pp., technical translation by D.A. Sinclair. National Research Council of Canada,Ottawa, 1963. 1959. 117 pp.

Orvin, A.K. Litt om Kilder pa Svalbard, Norsk Geografisk Tidsskrift, 1944. X(1), 16-38.

Piper, D.J.W., Porritt, C.J. Some pingos in Spitsbergen. Norsk Polarinstitutt A°rbok 1965, 1966. 80–84.

Pissart, A. Pingos and palsas: A review of the present state of knowledge, Polar Geography, 1985. 9:3, 171-195, DOI: 10.1080/10889378509377249

Pissart, A. Palsas, lithalsas and remnants of these periglacial mounds. A progress report. Prog. Phys. Geogr., 2002. 26 (4), 605–621

Porsild, A. E. Earth mounds in unglaciated arctic northwestern America. Geographical Review, 1938. 28, 46–58.

Ross, N., Harris, C., Christiansen, H.H., and Brabham, P.J. Ground penetrating radar investigations of open system pingos, Adventdalen, Svalbard, Norsk Geografisk Tidsskrift, 2005. 59(2), 129-138.

Rossi, G., Accaino, F., Boaga, J., Petronio, L., Romeo, R., and Wheeler, W. Seismic survey on an open pingo system in Adventdalen Valley, Spitsbergen, Svalbard, Near Surface Geophysics, 2018. 16(1), 1-15.

Salvigsen O., Elgersma A. Large-scale karst features and open taliks at Vardeborgsletta, outer Isfjorden, Svalbard. Polar Research, 1985. Vol. 3, No. 2, 145-153.

Seppälä, M. Palsas and related forms. Clark, M. J., editor, Advances in periglacial geomorphology. Chichester: Wiley Chapter 11, 1988. 247-278.

Soare, R. J.; Conway, Susan; Dohm, J. M. and El-Maarry, M. R. Possible open-system (hydraulic) pingos in and around the Argyre impact region of Mars. Earth and Planetary Science Letters, 2014. 398, 25–36. DOI: https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.04.044

Svendsen, J.I., Mangerud, J. Holocene glacial and climatic variations on Spitsbergen, Svalbard. The Holocene, 1997. 7, 45-57.

Terrengmodell Svalbard (SO Terrengmodell) // Norvegian Polar Institute, 2014. https://doi.org/10.21334/npolar.2014.dce53a47

Vasil'chuk, Yurij & Vasil'chuk, Alla & Budantseva, N.A. & Ju.N., Chizhova. Palsas in the northern European Russia: the southern and northern limits of the areal and the modern dynamic. Engineering Geology. 2011.

Walker, D. A., Walker, M. D., Everett, K. R., Weber, P. J. Pingos of the Prudhoe Bay region, Alaska. Arctic and Alpine Research, 1985. 17, 321–336.

Wetterich, S., Schirrmeister, L., Nazarova, L., Palagushkina, O., Bobrov, A., Pogosyan, L., Savelieva, L., Syrykh, L., Matthes, H., Fritz, M., Günther, F., Opel, T., Meyer, H.Holocene thermokarst and pingo development in the Kolyma Lowland (NE Siberia). Permafrost Periglacial Process, 2018. 29(3), 182-198. https://doi.org/10.1002/ppp.1979.

Wu Z, Barosh PJ, Hu D, Wu Z, Peisheng Y, Qisheng L, Chunjing Z. Migrating pingos in the permafrost region of the Tibetan Plateau, China and their hazard along the Golmud-Lhasa railway. Engineering Geology, 2005. 79: 267–287.

Yoshikawa, K., Lawson, D., Sharkhuu, N. Stable Isotope Composition of Ice Core in Openand Closed–System Pingos. Permafrost, Tenth International Conference, Proceedings, 2012. Ed. K.M. Hinkel. Salekhard, 25–29 June 2012. V. 1. Salekhard: The Northern Publisher. 473– 478.

Yoshikawa, K. and Harada, K. Observations on nearshore pingo growth, Adventdalen, Spitsbergen, Permafrost and Periglacial Processes, 1995. 6(4), 361-372.

Yoshikawa, K. Notes on Open-System Pingo Ice, Adventdalen, Spitsbergen. Permafrost and Periglacial Processes, 1993. 4(4), 327-334.