

ГЛЯЦИОЛОГИЯ И КРИОЛОГИЯ
GLACIOLOGY AND CRYOLOGY OF THE EARTH

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-278-307>
УДК 551.324.8



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

**Внутренняя дренажная система ледника Альдегонда,
Шпицберген, по данным спелеологических исследований***Б.Р. Мавлюдов**ФГБУН Институт географии РАН, Москва, Россия**bulatrm@bk.ru***Резюме**

В 2001–2021 гг. на леднике Альдегонда проводились исследования ледниковых колодцев и пещер спелеологическими методами для выяснения внутренней дренажной сети ледника. Рассмотрены положение в пространстве и строение обследованных полостей. Выявлено, что пещеры на языке ледника формируются по надвигам в толще льда. Поскольку все обследованные колодцы не достигают ложа ледника, высказано предположение, что вода из колодцев движется к языку ледника по надвигам, которые служат плоскостями скольжения. Полученные результаты могут помочь в интерпретации имеющихся геофизических данных для этого ледника.

Ключевые слова: колодцы, ледниковые пещеры, надвиги, плоскости скольжения.

Для цитирования: Мавлюдов Б.Р. Внутренняя дренажная система ледника Альдегонда, Шпицберген, по данным спелеологических исследований // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 3. С. 278–307. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-278-307>.

Поступила 01.06.2022

После переработки 30.06.2022

Принята 12.07.2022

**Internal drainage system of Aldegondabreen, Spitsbergen,
according to speleological studies***Bulat R. Mavlyudov**Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Geography
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia**bulatrm@bk.ru***Summary**

The systems of internal drainage of glaciers have been studied mainly by indirect methods. In order to reveal the structure of the internal drainage network inside Aldegondabreen, moulins and glacial caves were investigated by speleological methods in 2001–2021, which was accompanied by a semi-instrumental topographic survey in the cavities. This allowed us to see the change in the glacial cavities over time. There are three types of moulins

in Aldegondadreen: active, dead and healed ones. We visited active and dead moulins. The depth of the entrance pits in the moulins varies from 52 to 65 m (moulin group No 1), from 70 to 75 (moulin group No 2) and from 45 to 60 m (moulin group No 3). The depth of moulins is equal to the thickness of the cold ice layer. Using the structure of the moulins, we show that the water from moulin group No 1 flows to the right marginal part of the glacier tongue. The water from moulin groups No 2 and No 3 flows to the left margin part of the glacier tongue, which is confirmed by the mapping of healed moulins locations. We find that the number of active and dead moulins has been decreasing since 2001, while the number of healed moulins has increased. We attribute this to a decrease in the thickness of the temperate ice layer at the base of the glacier due to climate change. Many moulins have narrow meanders at the lower part of the entrance pits, which usually finish by siphons. None of the moulins reaches the glacier bed, their lower parts are usually located in clean transparent ice. The lifetime of the moulins usually does not exceed 6 years. Our study of the caves on the glacier tongue revealed that they can be englacial or subglacial, and they originate along sub-horizontal thrusts located in the ice. We assume that the moulins reach the slip planes along thrusts close to the glacier bed. The water from the moulins flows along these slip planes as a film in early summer and turns into channels in mid- or late summer. The presence of thrusts in the ice depths can explain the development of internal drainage systems in glaciers (regardless of their size), outbursts of glacial lakes, surges and the formation of eskers. Clastic material for eskers formation can penetrate into a cave channel from the contact areas of the thrusts with uplifts on the bed. The results obtained can help in the interpretation of the available geophysical data for this glacier.

Keywords: glacial caves, moulins, sliding plains, thrusts.

For Citation: Mavlyudov B.R. Internal drainage system of Aldegondabreen, Spitsbergen, according to speleological studies. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (3): 278–307. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-278-307>.

Received 01.06.2022

Revised 30.06.2022

Accepted 12.07.2022

ВВЕДЕНИЕ

Ледниковый карст представлен на ледниках полостями, образовавшимися при захоронении ледяных каньонов поверхностных водотоков в толще льда, ледниковыми колодцами и пещерами. Ледниковый карст широко развит на архипелаге Шпицберген, где к настоящему времени полости описаны на многих ледниках [1–3 и др.]. Все эти полости формируют в толще ледников и под ними внутренние дренажные системы, которые обеспечивают перевод поверхностных вод в толщу льда, а потом вывод их на поверхность на языках ледников [4].

Ледник Альдегонда — небольшой горно-долинный ледник, расположенный на западном берегу залива Грён-фьорд в 7 км на юго-запад от российского поселка Баренцбург на Шпицбергене. Ледник ориентирован примерно на восток и имеет протяженность около 3 км при ширине около 2 км. Язык ледника в настоящее время находится на высотах от 100 до 200 м н. у. м. Практически вся поверхность ледника за исключением высоко расположенных участков в последнее время оказалась в зоне абляции, область аккумуляции исчезла, т. е. ледник в летнее время тает практически со всех сторон, из-за чего его размеры и масса ежегодно сокращаются. О масштабах изменения ледника можно судить по тому, что еще в начале XX в. язык ледника обрывом спускался в море [5, 6], а в настоящее время он отступил от берега более чем на 2 км. Основным проявлением ледникового карста на леднике является развитая внутренняя система дренажа в виде ледниковых пещер на языке ледника и ледниковых колодцев в его средней части.

Исследование ледниковых пещер на языке ледника Альдегонда началось в 1980-х гг. В 1982–1986 гг. разные исследователи посещали ледниковую пещеру

в средней части языка ледника [7]. В эти годы пещера изменялась от внутриледной до подледной и имела от одного до трех этажей при разной протяженности галерей. На леднике также имелись ледниковые колодцы, но их исследование не проводилось. В 1999 г. на леднике была осуществлена георадиолокационная съемка, по результатам которой было доказано двухслойное строение ледника и высказано предположение о наличии внутреннего дренажного канала вдоль правого борта ледника [8]. Наши спелеологические исследования ледниковых пещер и колодцев на леднике Альдегонда с целью понять внутреннюю дренажную систему ледника начались в 2001 г. и продолжались до 2021 г. с некоторыми перерывами [4, 7, 9–11 и др.]. В 2006 г. нами совместно с сотрудниками ААНИИ на леднике Альдегонда был применен метод окрашивания водных потоков, который позволил уточнить направление дренажа и оценить скорость движения воды в ледниковых каналах [12]. Повторные георадиолокационные исследования на леднике были проведены в 2018–2020 гг., они показали изменения внутренней структуры ледника, произошедшие за 20 лет [13]. Интерпретация этих данных совместно с геохимическими исследованиями позволила предложить новую схему внутреннего дренажа ледника [14].

Таким образом, для ледника характерно развитие внутренней дренажной системы, через которую попавшие внутрь ледника воды дренируются за его пределы.

Ледник Альдегонда относится к ледникам политермического типа, что означает, что он состоит из двух слоев: внешнего холодного с отрицательной температурой льда и нижнего теплого с температурой плавления льда [8, 13]. Для конкретного ледника это подразумевает, что по периферии ледника лед приморожен к ложу, а теплый лед сосредоточен только в средней части ледника под слоем холодного льда. Поскольку ледниковый лед обладает собственным движением, то на его поверхности возникают ледниковые трещины, которые могут поглощать талые воды поверхностных водных потоков. Именно по этим трещинам и возникают ледниковые колодцы. С ледниковыми пещерами на языке ледника дело обстоит сложнее, поскольку реальные причины их формирования до настоящего времени не вполне ясны.

Поскольку все проведенные георадарные исследования не опирались на результаты прямых спелеологических наблюдений на леднике [например, 9–11], то основной задачей данного исследования явилось обобщение полученных ранее результатов прямых исследований элементов внутренней дренажной системы на этом леднике спелеологическими методами, что может в дальнейшем помочь в интерпретации геофизических данных.

МЕТОДИКА

Спелеологическими методами исследовались как пещеры на языке ледника, так и колодцы в средней части ледника. Все полости на леднике выявлялись в летнее время по поглощению или извержению водных потоков при маршрутных обследованиях, координаты их входов фиксировались при помощи GPS. Обычно ледниковые колодцы выявлялись попутно при измерении абляционных реек при исследованиях баланса массы, и только в 2003 г. было проведено специальное прочесывание поверхности ледника на предмет выявления всех типов колодцев, которые хорошо идентифицировались в полевых условиях. Ледниковые пещеры на языке ледника подразделялись на полости, из которых вытекала вода, и сухие полости, которые вода покинула некоторое время назад.

В летнее время имелась возможность посещать только ледниковые колодцы, потерявшие водное питание, то есть мертвые. Активные ледниковые колодцы исследовались в конце осени или в начале зимы при отсутствии стекающих в них водных потоков. Часто при отсутствии водных потоков на поверхности ледника во внутренних частях колодцев и пещер в небольшом количестве сохранялась вода, из-за чего в них приходилось работать в гидрокостюмах. Спуск и подъем в ледниковых колодцах производились по веревкам с использованием альпинистского снаряжения. В полостях производились описание, полуинструментальная топографическая съемка, установка и измерение реперов, фотографирование. Реперы в виде деревянных стержней или латунных трубок диаметром 1,5 см устанавливались в нижних частях ледниковых колодцев на противоположных стенах пещерного канала. Первоначально деревянные реперы помещались в отверстия, пробуренные ледобурным крюком на глубину 15 см, но потеря нескольких реперов заставила увеличить глубину установки реперов до 30 см в отверстия, пробуренные коловоротом. Выступление реперов и расстояние между вершинами реперов на разных стенах канала измерялись тесняной рулеткой с точностью ± 1 см с частотой один раз в год. Для фиксирования положения входов в ледниковые колодцы и пещеры использовались GPS Garmin 12 и Garmin GPSmap 60CSx с точностью определения координат и высот ± 10 м. Из-за малой величины скорости движения льда на леднике не определялись. Поскольку посещение ледниковых колодцев и пещер обычно происходило в сентябре, когда вода в колодцах и пещерных ходах в их основании продолжала течь в небольших количествах, температура воды и стен была близка к нулевой и измерялась только в отдельных полостях. Изменение дневной поверхности льда определялось по абляционным рейкам. Объем воды, поступающий в ледниковые колодцы, определялся экспертным способом приблизительно.

Уровни стояния воды в колодцах и галереях, отходящих от их основания, отмечались по уровням примерзших к стенкам зерен снега. В некоторых случаях скопления принесенного водой снега полностью блокировали проход в канале.

Для проведения топоъемки в полостях применялась стандартная методика с использованием рулетки и горного компаса [15]. Данные топоъемки позволили строить планы полостей, а также разрезы ледниковых колодцев и разрез-развертки всей полости с вертикальным сечением через колодец и вдоль протяжения всей пещерной галереи. Высота уступов, показанная цифрами на планах полостей, позволяет соотнести их с разрезами и разрезами-развертками пещерных каналов.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Положение ледниковых колодцев

В настоящее время известно, что ледниковые колодцы могут образоваться двумя способами [4, 16]. Во всех известных случаях ледниковый колодец возникает по какой-то плоскости. В первом случае это ледниковые трещины, которые известны на многих ледниках. При этом начальная глубина колодца соответствует глубине первичной трещины. В дальнейшем глубина колодца будет зависеть от величины поверхностной абляции и интенсивности врезания дна колодца под действием термоэрозии падающего в него водного потока. Во-вторых, колодцы могут образоваться в заброшенных ледяных каньонах, когда водный поток попадает в запечатанный каньон сбоку (со стороны) и обрушивается в него. В этом случае глубина колодца будет соответствовать

глубине каньона и в дальнейшем будет зависеть от величины поверхностной абляции и интенсивности врезания водного потока в русло ледяного каньона. В литературе также имеется мнение, что ледниковые колодцы могут возникнуть при попятной эрозии в мелких колодцах каскада [17], который может сформироваться по наклонной трещине или в районе замыкания трещины. Однако такой способ образования колодца вряд ли возможен, так как выделение тепла при падении воды происходит на всех участках каскада с одинаковой интенсивностью. Скорее всего, этот колодец образовался по трещине, возникшей в верхней части каскада, которая и перехватила поток, а каскад, потеряв воду, отмер. Исследователи не обнаружили этого явления, поскольку между их посещениями полости проходило несколько лет.

Поверхностный поток талых вод встречает на своем пути трещину и начинает падать в нее. Если эта трещина в нижней части не имеет оттока воды, то вода просто заполнит трещину и вытечет в ее самом низком месте. Это многократно наблюдалось на многих ледниках. Предполагается, что одним из механизмов углубления трещин в ледниках является естественный гидроразрыв трещин [18 и др.]. Если трещина имеет возможность дренировать воду и ее пространство заполнено воздухом, то по ней может сформироваться ледниковый колодец. Колодец не формируется одновременно с началом падения воды в трещину. Для этого требуется время в зависимости от условий от недели и более. Как правило, ледниковые колодцы имеют цилиндрическую или слабо

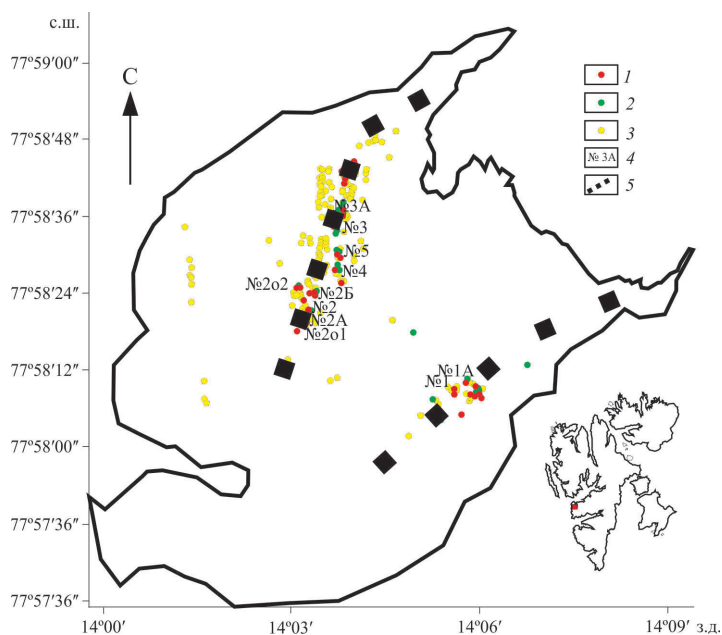


Рис. 1. Положение выявленных колодцев на леднике Альдегонда.

1 — активные колодцы; 2 — мертвые колодцы; 3 — залеченные колодцы; 4 — номера исследованных колодцев; 5 — предполагаемые каналы внутреннего дренажа. Контуры языка ледника даны по съемке летом 2021 г. На врезке показано положение ледника Альдегонда на архипелаге Шпицберген

Fig. 1. Position of moulins identified on Aldegondabreen.

1 — active; 2 — dead; 3 — healed; 4 — numbers of moulins investigated; 5 — anticipated internal drainage channels. The outlines of the glacier tongue are given according to the survey in the summer of 2021. The inset shows the position of Aldegondabreen on Spitsbergen Archipelago

Таблица 1

Table 1

Данные о выявленных и обследованных колодах ледника Альдегонда

Data on the moulins identified and surveyed on Aldegondabreen

Год	Активные колоды				Мертвые колоды				Заросшие колоды		
	Выявлено	Обследовано			Выявлено	Обследовано					
		Номер	Дата	Координаты Широта, [°] Долгота, [°]		Высота, м н. у. м.	Номер	Дата		Координаты Широта, [°] Долгота, [°]	Высота, м н. у. м.
2001	—	—	—	—	>1	№ 3	15.08	77,97663	14,06261	262	—
2002	28	№ 1	08.09	77,96922	14,09378	264	2-0-1	28.08	77,97344	14,05619	284
2003	31 (14,6%)	№ 1	13.09	77,96922	14,09378	264	2-0-2	10.09	77,97722	14,06381	269
		№ 2	14.09	77,97652	14,06083	280	№ А	25.08	77,97503	14,06269	276
		№ 3	14.09	77,97646	14,06103	263	№ Б	25.08	77,97639	14,06136	274
		№ 1	10.09	77,96922	14,09378	260					
2004	11	№ 2Б	15.09	77,97342	14,05633	265	№ 3	11.09	77,97646	14,06103	263
		№ 3А	11.09	77,97646	14,06103	263	№ 4	14.09	77,97436	14,06178	265
		№ 5	13.09	77,97500	14,06267	265					
		№ 2А	15.09	77,97211	14,05331	265					
2006	6	№ 2	17.09	77,97417	14,05706	265	№ 2	14.09	77,97417	14,05706	265
		№ 1	05.09	77,96922	14,09378	252	№ 3	14.09	77,97646	14,06103	263
		№ 5	16.09	77,97500	14,06267	267					
		№ 3А	14.09	77,97646	14,06103	261					
2007	3	№ 1	26.08	77,96922	14,09378	250					—
2008	4	№ 1	13.09	77,96922	14,09378	248					3
2009	1	№ 1	27.08	77,96922	14,09378	246					2
2010	4	№ 1	13.09	77,96922	14,09378	244	№ 1	13.09	77,96922	14,09378	—
2013	2	№ 3Б	12.09	77,97833	14,06429	254	№ 3	12.09	77,97646	14,06103	
		—	—	—	—	—	№ 3А	09.09	77,97646	14,06103	
2014	2	№ 1А	26.09	77,96963	14,09715	237	№ 1	09.09	77,96922	14,09378	1
2016	2	№ 2	25.09	77,97383	14,05618	258	№ 3А	09.09	77,97646	14,06103	—
		—	—	—	—	—	№ 1	07.09	77,96963	14,09715	234
2017	1	—	—	—	—	—	№ 2	—	—	—	—
2019	7	—	—	—	—	—	№ 1	—	—	—	2
2020	2	—	—	—	—	—	№ 2	—	—	—	5
2021	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3

коническую форму с расширением книзу. Такая форма колодца связана с тем, что на глубине 15–20 м от поверхности после свободного падения водная струя начинает разбрызгиваться, создавая облако крупных капель [19]. Именно падение этих капель в зоне разбрызгивания и попадание их на стены формируют цилиндрическую форму во льду из-за нагревания воды при падении потока и переходе его потенциальной энергии в кинетическую. Колодцы могут формироваться только выше уровня стояния воды во льду.

Посещение колодцев на леднике Альдегонда началось с 2001 г. Среди ледниковых колодцев были выделены три основных типа: активные, т. е. поглощающие потоки талых вод, мертвые, т. е. потерявшие питание водными потоками, и заросшие (залеченные), или «раскристаллизованные», — умершие колодцы, которые были заполнены водой, со временем замерзшей, в рельефе поверхности ледника они не выделяются. «Раскристаллизованные», или заросшие, колодцы по структуре сильно отличались от окружающего ледникового льда, поскольку имели радиально-лучистую структуру расположения ледяных кристаллов, длина которых достигала половины диаметра колодца. Положение разных типов ледниковых колодцев показано на рис. 1.

Данные о ледниковых колодцах, которые были выявлены и посещались в разные годы на леднике, приведены в табл. 1.

При выявлении всех колодцев в 2003 г. было обнаружено наибольшее количество активных, мертвых и заросших колодцев на леднике (см. рис. 1). Оказалось, что количество открытых колодцев (активных и мертвых) составляет 21 % от общего числа выявленных колодцев. Колодцы на леднике обычно при потере питания талыми водами эволюционируют от активных до мертвых и далее до заросших. Со временем активных и мертвых колодцев становилось все меньше, они переходили в разряд заросших. В 2021 г. активными остались только колодцы в средней части ледника и у его правого борта.

Как видим, количество обследованных колодцев уменьшилось в последние годы, что было связано в основном с тем, что морозная погода не наступала во время посещения Шпицбергена, которое обычно проходило в сентябре. В 2021 г. посещение колодцев не состоялось из-за резкого потепления с дождями во второй половине сентября, когда температура воздуха поднималась до 7 °С, а талая вода вернулась в колодцы.

Строение ледниковых колодцев

Всего на леднике Альдегонда было обследовано три группы колодцев. Количество колодцев в группах было различным. В первой группе было обследовано в разное время 2 колодца, во второй группе — 8 колодцев, в третьей группе — 3 колодца.

Группа колодца № 1. Колодец № 1. Колодец расположен у правого борта ледника (координаты: широта — долгота — высота: 77,96922° — 14,09378° — 264 м н. у. м.). Его посещение проходило ежегодно с 2002 по 2010 г. В большинстве случаев в нем проводилась топосъемка, результаты которой приведены на рис. 2. После вынужденного перерыва исследований в 2011–2012 гг. посещение ледника в 2013 г. показало, что колодец за время нашего отсутствия прекратил свое существование: был полностью заполнен водой и начал зарастать кристаллами льда. С этого года он больше ни разу не вскрылся. В 2014 г. мы обследовали соседний вновь возникший колодец № 1А (рис. 3–I), расположенный примерно в 70 м к востоку от колодца № 1.

Анализ рис. 2 показывает, что на протяжении 8 лет, с 2002 по 2009 г. колодец имел примерно одинаковую глубину около 52–55 м, хотя сам цилиндрический ствол

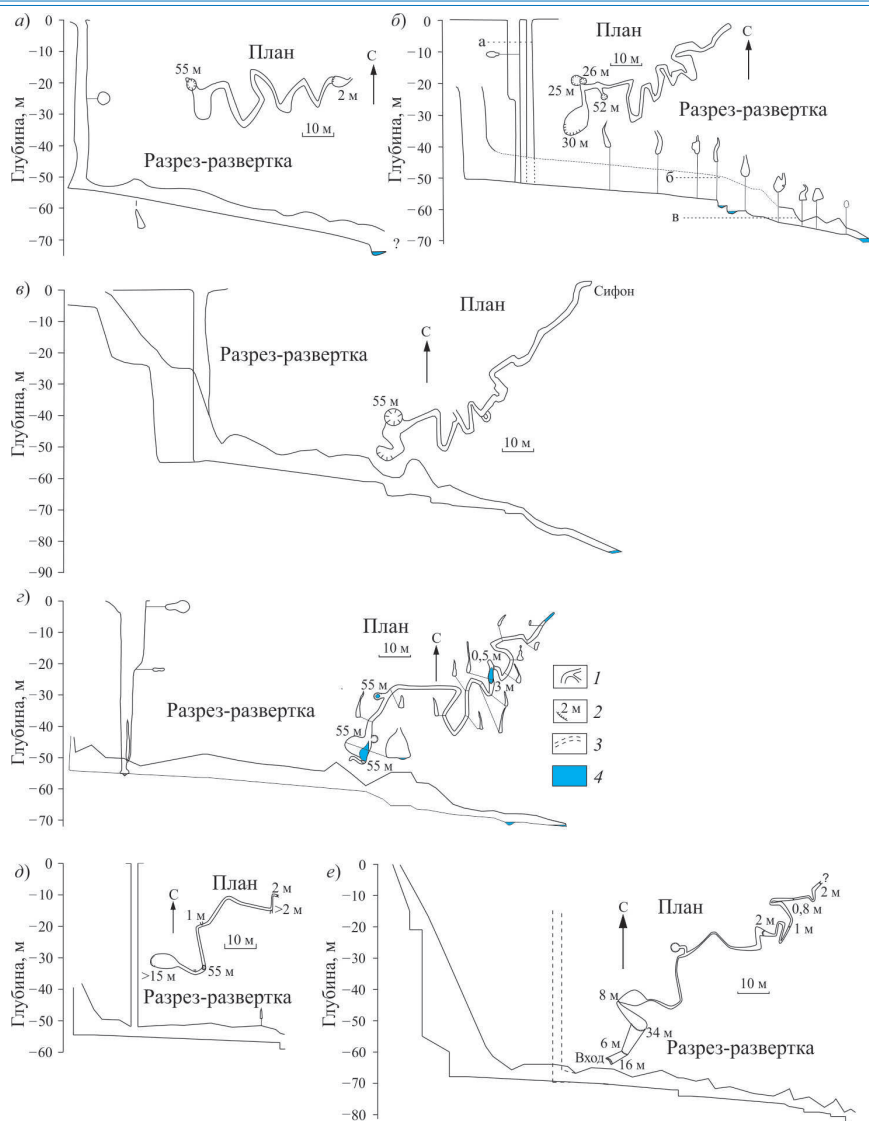


Рис. 2. Результаты топосъемок колодца № 1 на леднике Альдегонда в разные годы.

а) — 2002 г, б) — 2003 г, в) — 2004 г, г) — 2006 г, д) — 2009 г, е) — 2010 г. 1 — пещерные каналы, 2 — обрывы и их высота, 3 — примерное положение канала, 4 — вода. На рисунке б — а, б, в — уровни стояния воды

Fig. 2. Topographical survey results of moulin No 1 on Aldegondabreen in different years.

а) — 2002, б) — 2003, в) — 2004, г) — 2006, д) — 2009, е) — 2010. 1 — cave channels, 2 — cliffs and their height, 3 — approximate position of channel, 4 — water. In figure б — а, б, в — levels of standing water

входного колодца диаметром 2–3 м, по которому проникали в нижний меандр, в разные годы располагался в разных местах в пределах координат колодца № 1. Это означает, что скорость врезания потока в меандре на дне колодца (варьировала от 1,5 до 3 м/год) примерно соответствовала понижению поверхности ледника у входа

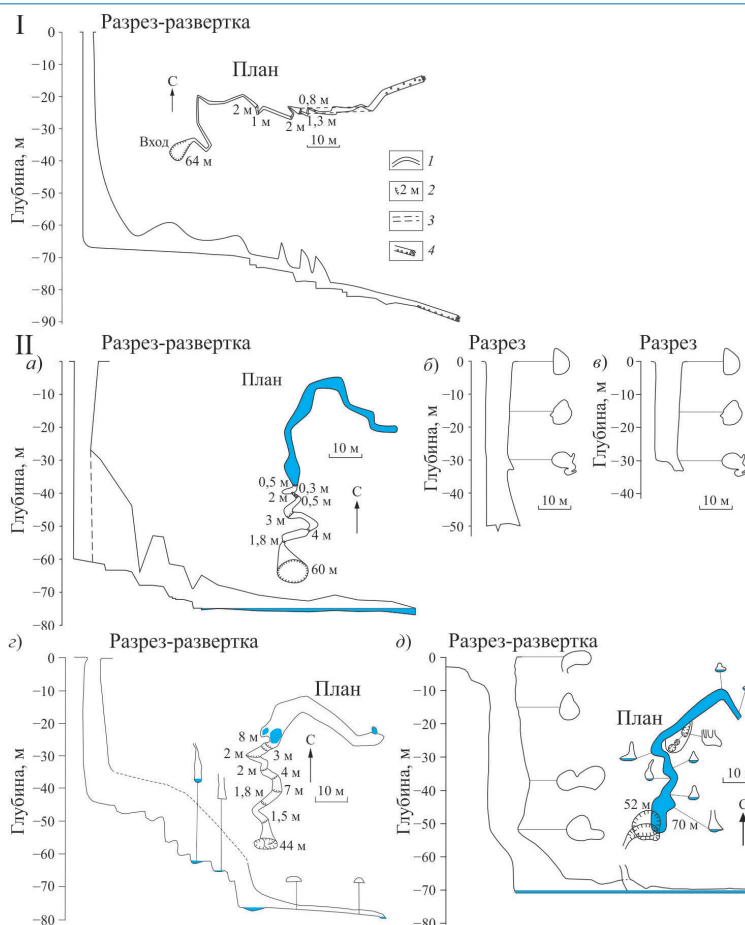


Рис. 3. Результаты топосъемки в колодце № 1А в 2014 г. (I) и группе колодцев № 3 в разные годы (II): а) — № 3 в 2003 г., б) — № 3 в 2004 г., в) — № 3 в 2006 г., г) — № 3А в 2004 г., д) — № 3А в 2006 г.

Для I: 1 — пещерные каналы, 2 — обрывы и их высота, 3 — каналы верхнего этажа, 4 — цементированные снежные зерна на стенах и в блокаде канала. Для II: 1 — пещерные каналы, 2 — обрывы и их высота, 3 — поперечные сечения колодцев и каналов, 4 — вода

Fig. 3. Topographic survey results in moulin № 1А in 2014 (I) and moulin group No. 3 in different years (II): а) — No 3 in 2003, б) — No 3 in 2004, в) — No 3 in 2006, г) — No 3А in 2004, д) — No 3А in 2006.

For I: 1 — cave channels, 2 — cliffs and their height, 3 — channels of the upper floor, 4 — cemented snow grains on the walls and in the blockade of the channel. For II: 1 — cave channels, 2 — cliffs and their height, 3 — cross-sections of pits and channels, 4 — water

в колодец, которая изменялась от 1 до 1,8 м/год. В 2010 г. попасть в колодец через прежние входы не удалось, так как они оказались заполненными снегом. Спуск происходил через другой вход, который находился выше по склону в долине поверхностного меандра, втекающего в колодец. В этом случае входной колодец с уступом до внутреннего меандра имел общую глубину около 65 м. Похожую глубину имел и колодец № 1А, который возник после отмирания колодца № 1.

Во всех случаях меандр, начинающийся от основания колодца № 1, имел уклон русла около 3–5° и ширину от 0,6 до 1 м. Через примерно 100 м по меандру он превращался в округлую трубу диаметром около 1,5–2 м с уклоном около 20°, который в конечной точке был заполнен водой, образующей сифон. Если посмотреть на план меандра в нижней части колодца, то можно видеть, что он изменялся во времени. Постепенно меандр прирастал в юго-западном направлении в верховьях меандра за счет попятной эрозии стенки колодца, по которой вода водопадом обрушивалась вниз. За 8 лет прирост длины полости составил около 50 м, что соответствует средней скорости попятной эрозии колодца около 6 м/год. Наибольшей глубины в нижнем конце меандра в колодце № 1 удалось достичь осенью 2004 г., когда общая глубина системы каналов превысила 80 м. В предыдущие и последующие годы до этой части канала добираться не удавалось, так как она все время была заполнена водой гораздо выше этой точки примерно на 10 м или более.

Несколько видоизменялись во времени и сами меандры. Происходило не только медленное перемещение меандров в северо-восточном направлении, но и прободение наиболее изогнутых и сближенных петель меандра и спрямление русла. Отшнурованная и покинутая потоком часть меандра переставала врезаться в лед, оставалась в стороне и постепенно закрывалась пластической деформацией льда.

Мы ставили вешки в канале меандра, чтобы определить скорость врезания потока в лед на дне меандра, а также оценить скорость пластической деформации, сжимающей каналы. По нашим измерениям смыкание канала в 2007–2009 гг. составило 0,3–0,36 м/год, а в 2010 г. — 0,69 м/год. К сожалению, измерить изменения по рейкам, установленным на дне колодца в 2010 г., из-за его отмирания не удалось. Считая скорость понижения поверхности ледника около 1,5 м/год, можно предположить, что если скорость таяния льда в этой точке на леднике в будущем не изменится, то полуметровые латунные трубки, установленные на дне колодца, окажутся на поверхности ледника через 35–40 лет.

Многочисленные уровни на стенах канала и входного колодца из примерзших к стенам зерен фирнизированного снега свидетельствовали о том, что в весеннее время в полость вместе с талой водой попадает снег в виде отдельных зерен, переносимых потоками талых вод, или в виде водоснежных потоков, а также о том, что в полости в течение продолжительного периода стояла вода. В весеннее время полость почти полностью заполнена водой, то есть в нижней части она имеет малую пропускную способность для воды, вероятно, из-за сжатия каналов пластической деформацией в зимнее время. Потом в течение сезона абляции каналы постепенно расширяются термоэрозией, и уровень стояния воды в полостях падает.

Вертикальные щелевые каналы меандра имели высоту до 5 м, а выше выклинивались. Всегда в месте выклинивания канала вверх была видна полоса белого льда шириной 10–15 см, отмечавшая положение прежнего канала, который до полного сжатия был заполнен снежной шугой. Именно сильная пористость снежной шуги приводила после сжатия силами пластической деформации к формированию белой полосы в своде канала.

Колодец № 1А (координаты: 77,96963° — 14,09715° — 237 м н. у. м.). Этот колодец практически идентичен колодцу № 1, он повторяет его морфологию (см. рис. 3–I). Отличие состоит в том, что он сформировался незадолго до его посещения в 2014 г. (в период между 2010 и 2013 гг.). Поэтому каналы меандра были

еще преимущественно узкими (0,5–0,6 м) за исключением участка, начинающегося с глубины около 80 м от поверхности, когда канал становился трубообразным шириной около 2 м. Глубина колодца с меандром достигала 90 м. Последние 15 м стен канала были покрыты остатками шуги, являвшейся следами заполнения канала водой. И заканчивалось эта часть канала не сифоном, а скоплениями смерзшейся снежной шуги, полностью блокировавшей все сечение канала. Мы не наблюдали нигде прямой связи этого нового колодца с колодцем № 1. Но не исключено, что соединением мог быть нижний участок в глубокой части колодца № 1, который был заполнен водой. Это предположение имеет основание, поскольку канал в меандре колодца № 1А резко увеличился в размерах после небольшого уступа в таком месте, где свод канала резко поднимался.

Группа колодцев № 2. Группа этих колодцев расположена в центральной части ледника. Первые два колодца, которые посещались еще в 2002 г., были мертвыми. *Первый колодец* (№ 2–0–1), полуактивный, т. е. частично потерявший водное питание, имел входной ствол глубиной 54 м, координаты: 77,97344° — 14,05619° — 284 м н. у. м. Его начальный диаметр около 2,5 м книзу расширился до 5–6 м и далее переходил во врезанную в пол щель шириной 0,5–1 м, которая уступами разной высоты (3, 6 и 8 м) понижалась в юго-восточном направлении (рис. 4). Между уступами щель имела почти горизонтальный пол (за исключением водобойной ямы). Дальше щель становилась более низкой и продолжалась в том же направлении. Общая глубина пройденной части составила 70 м.

Второй колодец (№ 2–0–2) был мертвым (координаты: 77,97722° — 14,06381° — 269 м н. у. м.), не поглощал воду и начинал постепенно заполняться снегом и льдом. Шахта представляла собой комбинацию из двух колодцев, которые были разделены ледяной перегородкой шириной около 2 м, и на глубине около 40 м от поверхности колодцы сливались в одну полость (см. рис. 3). Общая глубина шахты составляла 58 м, продвижение вниз было блокировано ледяным глыбовым завалом. Один из колодцев практически вертикально доходил до дна (его диаметр 2–2,5 м), а второй имел глубину 22 м, после чего через серию наклонных галерей и небольшого колодца глубиной 11 м соединялся с первым колодцем. Снежная пробка на дне второго колодца вскоре перекрыла наклонные галереи, и колодец отделился от соседа полностью. На стенах наклонных галерей были обнаружены пластинчатые внутриводные кристаллы льда до 10 см в поперечнике (при толщине 1–1,5 мм). Вероятно, весной колодец полностью заливался водой. Колодец не получал питания водными потоками с поверхности, поэтому заберегов из снежных кристаллов на его стенах отмечено не было.

Колодец № 2 располагался в центральной части ледника (координаты: 77,97652° — 14,06083° — 280 м н. у. м.), дренировал его юго-западную часть и имел входной ствол глубиной около 75 м. Это был не один колодец, а группа колодцев, образующихся примерно в одном месте в разное время. После возникновения нового колодца старый колодец отмирал и начинал заполняться снегом и льдом или водой. За указанный период мы посетили две генерации колодца № 2. То есть время жизни каждой генерации колодца после отмирания составляла около 6–8 лет.

Несмотря на то, что положение колодца изменялось, он дренировал примерно одну и ту же область ледника (площадь водосбора колодца около 1,7 км² при питании одной рекой и около 2 км² при питании двумя реками). Колодец поглощал самую крупную реку, протекающую по поверхности ледника (до 500 л/с), и имел

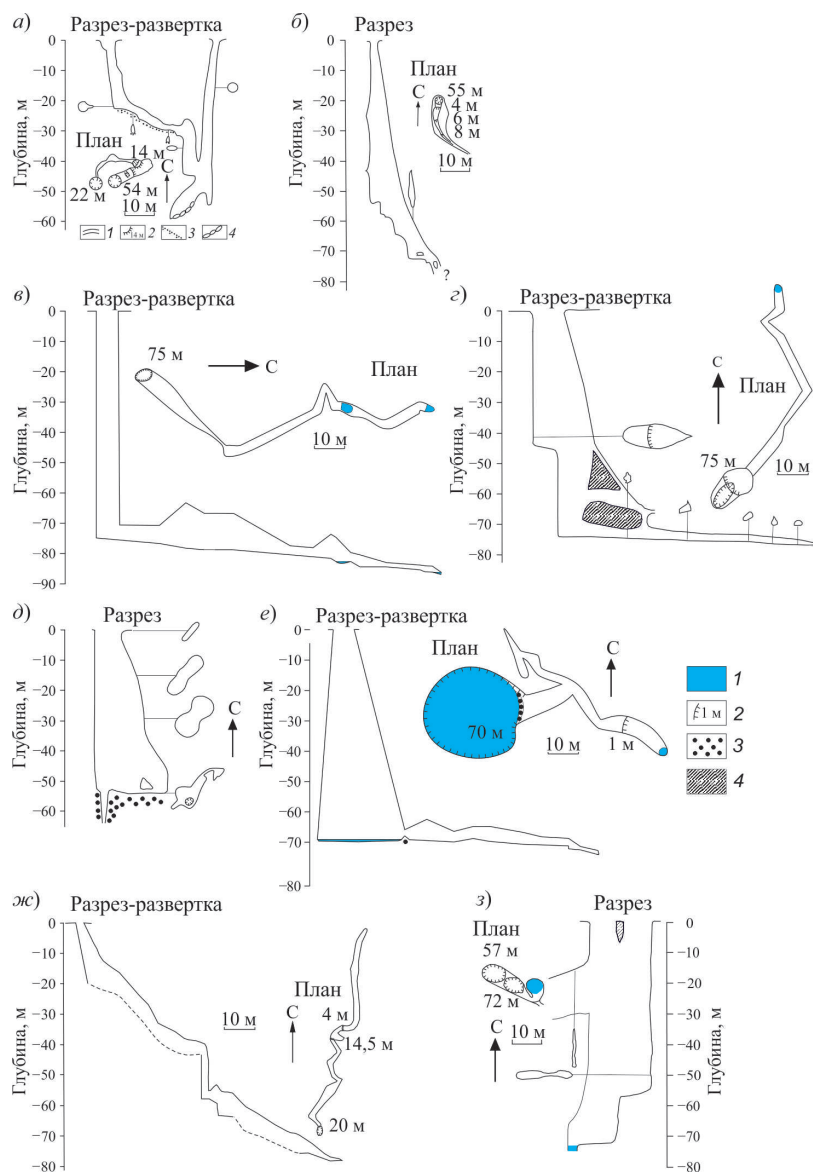


Рис. 4. Группа ледниковых колодцев № 2: а) — № 2-0-2 в 2002 г., б) — № 2-0-1 в 2002 г., в) — № 2 в 2003 г., г) — № 2 в 2004 г., д) — № 2 в 2006 г., е) — № 2 в 2014 г., ж) — № 2А в 2004 г., з) — № 2Б в 2004 г.

1 — вода, 2 — обрывы и их высота, 3 — снег и фирн, 4 — лед (на разрезах)

Fig. 4. Group of moulin No 2: а) — No 2-0-2 in 2002, б) — No 2-0-1 in 2002, в) — No 2 in 2003, г) — No 2 in 2004, д) — No 2 in 2006, е) — No 2 in 2014, ж) — No 2A in 2004, з) — No 2B in 2004.

1 — water, 2 — cliffs and their height, 3 — snow and firn, 4 — ice (on cross sections)

самый крупный входной колодец и каналы с его дна. Размеры колодца особенно возросли, когда он стал поглощать не одну, а две поверхностных реки, т. е. когда вода из «озера» (небольшая котловина на поверхности льда в верховьях ледника, в которой в весеннее время стоит вода и из которой вытекает поверхностный водоток), которая ранее поглощалась колодцем № 3, в 2006 г. стала поглощаться колодцем № 2. При исследовании колодца в 2014 г. глубина его ствола составляла 70 м, а диаметр основания колодца, на котором стояло неглубокое озеро, превышал 30 м. Во всех исследованных случаях канал, отходящий от дна колодца, не выходил на ложе ледника, а оставался внутриледным. При этом канал в основании колодца проникал в слой прозрачного льда, который характерен для основания многих ледников Шпицбергена. Иными словами, от основания колодца канал шел во льду неподалеку от ложа ледника.

В первом *колодце* № 2 в 2003 г. после ствола 75 м глубиной начиналась слабо наклонная галерея, достигшая сифона через 113 м (см. рис. 3). В 2004 г. длина субгоризонтальной части полости сократилась до 85 м, так как была залита водой. Если в 2003 г. входной колодец был сплошной трубой, то в 2004 г. примерно в его середине появился уступ. В 2004 г. колодец потерял водное питание и стал заполняться снегом. В 2006 г. глубина входного колодца сократилась до 54 м, а вся нижняя часть полости оказалась недоступной. За 2 года канал шириной 2 м был полностью сжат пластической деформацией, что соответствует скорости деформации около 1 м/год.

Второй *колодец* № 2 возник около 2006 г. на слиянии двух поверхностных рек (координаты: 77,97417° — 14,05706° — 265 м н. у. м.) и просуществовал примерно до 2014 г., когда одна из рек ушла в сторону от колодца и потекла к языку ледника. В 2014 г. этот колодец имел самые большие размеры при глубине около 70 м. В 2019 г. в нем на глубине 30 м от поверхности стояло озеро (топосъемка в колодце не проводилась), а неподалеку (в 20 м к югу) находился активный колодец с втекающей в него рекой. В 2021 г. колодец оказался полностью запечатанным снегом.

В 2004 г. вода, обычно текущая в колодец № 2, в течение летнего сезона мигрировала и временно (в течение месяца) поглощалась другим колодцем № 2А (см. рис. 4), координаты: 77,97211° — 14,05331° — 265 м н. у. м. Эта полость оказалась необычной тем, что у нее не было глубокого входного колодца, а с глубины 20 м начинался каскад мелких и средних колодцев, который доходил до глубины 75 м. Возможно, в этом случае мигрировавший по поверхности ледника водный поток вскрыл один из мертвых или заросших колодцев и подновил его.

Колодец № 2Б (координаты: 77,97342° — 14,05633° — 265 м н. у. м.), который также временно перехватывал летом 2004 г. поток, обычно текущий в колодец № 2, был полной противоположностью колодцу № 2А и представлял собой один ствол глубиной 72 м, на дне которого стояло круглое озеро диаметром около 4 м (см. рис. 4). В средней части колодца в стене находился вход в щелевой меандр. Если до поглощения потока колодец имел вдвое меньшую глубину и продолжался меандром, то поглощенный поток нашел новую трещину и углубил колодец, а меандр остался в стороне и отмер.

Колодец № 4 (координаты: 77,97436° — 14,06178° — 265 м н. у. м.) по соседству с колодцем № 2, который в 2004 г. начинался наклонным колодцем глубиной 36 м, переходил в каскад мелких колодцев (глубина от 3,5 до 8,5 м), уходящий на глубину более 70 м, где после небольшой субгоризонтальной части заканчивался сифоном (рис. 5).

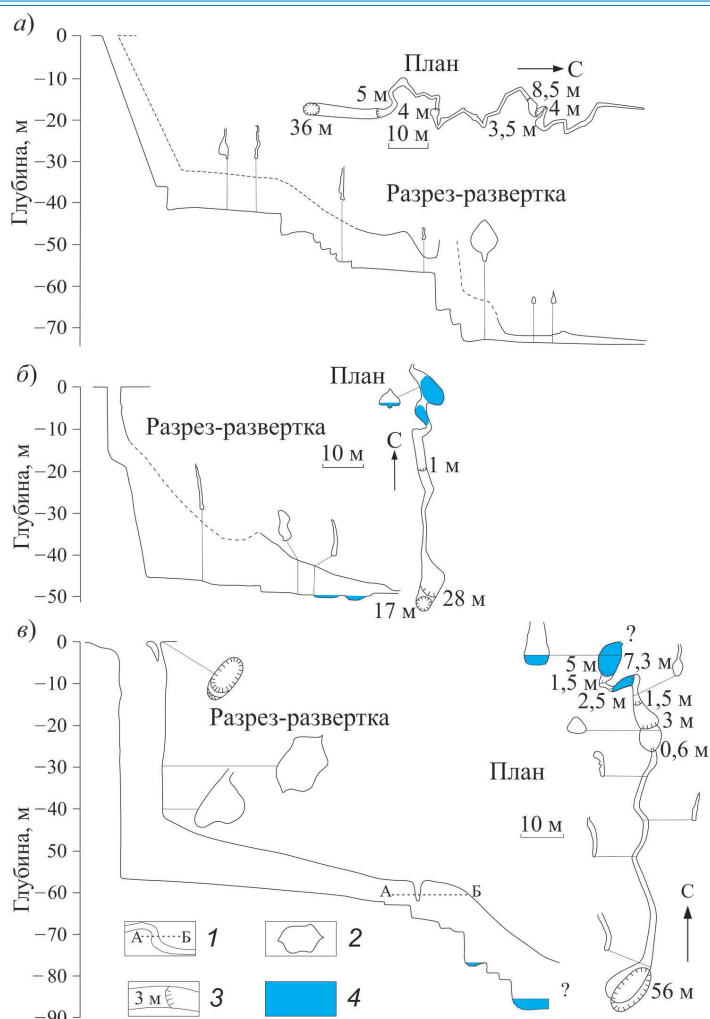


Рис. 5. Группа ледниковых колодцев № 2 (продолжение): а) — № 4 в 2004 г., б) — № 5 в 2004 г., в) — № 5 в 2006 г.

1 — уровень стояния окрашенной воды в канале, 2 — поперечные сечения колодцев и каналов, 3 — обрывы и их высота, 4 — вода

Fig. 4. Group of moulins № 2 (continued): а) — No 4 in 2004, б) — No 5 in 2004, в) — No 5 in 2006. 1 — level of colored water in the channel, 2 — cross-sections of moulins and channels, 3 — cliffs and their height, 4 — water

Колодец № 5 (координаты: $77,97500^{\circ}$ — $14,06267^{\circ}$ — 265 м н. у. м.) в 2004 г. на глубине 45 м от поверхности переходил в субгоризонтальную часть, заканчивающуюся непроходимым сужением (см. рис. 5). Посещение этого колодца в 2006 г. показало исчезновение уступа в колодце, углубление его до 57 м и углубление всей полости, так как после субгоризонтальной части начинался каскад мелких колодцев (глубина от 1 до 7 м), который на глубине 85 м приводил к сифонному озеру (см. рис. 5). Этот колодец за 2 года углубился примерно по той же трещине, где старый канал был виден как второй этаж в стене колодца. Колодец был интересен

еще и тем, что в 2006 г. в него в июле бросали родамин для определения скорости внутреннего потока воды в леднике. Посещение колодца в сентябре показало, что во время эксперимента по окрашиванию впадающего в колодец потока в нем стояло озеро с уровнем на глубине около 60 м от поверхности — это было видно по следу краски на стене. Видимо, наличие таких затопленных участков полостей способно привести к занижению результатов скорости движения внутриледных водных потоков в ледниках.

Группа колодцев № 3. В эту группу входят 3 обследованных колодца (рис. 3—II). Первый исследованный в 2001 г. колодец был мертвым, в него поступала только вода из коры таяния. Колодец диаметром около 5 м имел глубину 45 м. Этот мертвый колодец уже начал заполняться снегом, хотя след от отходящего со дна меандра еще сохранился. В 2002 г. глубина колодца уже не превышала 32 м, а на дне лежала снежная пробка. В дальнейшем глубина колодца ежегодно уменьшалась, пока он через несколько лет не перешел в разряд заросших (залеченных) колодцев.

Колодец № 3 (координаты: 77,97646° — 14,06103° — 263 м н. у. м.). Колодец был исследован в 2003 г. и дренировал северо-западную часть в верховьях ледника. Расход водотока, впадающего в колодец, летом составлял около 500 л/с. Входной колодец имел глубину около 60 м (см. рис. 3—II). Со дна колодца начинался каскад с водобойными ямами, приводивший к почти горизонтальной галерее, пол которой был полностью залит водой. Извилистое озеро шириной до 4 м и глубиной до 1,2 м и более тянулось на протяжении 65 м и упиралось в сифон. В 2004 г. колодец потерял основное питание и стал залечиваться. Глубина входного колодца составила 50 м, дно оказалось завалено снегом и льдом. Небольшая струя воды, падавшая в колодец, пробилась в снегу яму диаметром 1,5 м и глубиной 2 м. Вся нижняя часть меандра сомкнулась пластической деформацией. В 2006 г. глубина колодца составляла 30 м, в 2009 г. колодец был заполнен водой, а в 2010 г. глубина колодца до снега составляла 12,5 м. В 2013 г. это уже был заросший колодец. Для перехода от активного колодца до заросшего потребовалось 8 лет.

Колодец № 3А. Колодец перехватил сток у колодца № 3 и в 2004 г. стал дренировать северо-западную часть в верховьях ледника. Расход водотока, впадающего в колодец, летом составлял около 200 л/с. Входной колодец имел глубину около 40 м (см. рис. 3—II). Со дна колодца начинался каскад с водобойными ямами, приводивший к почти горизонтальной галерее, пол которой был полностью залит водой. Извилистое озеро шириной до 4 м и глубиной до 1,2 м и более тянулось на протяжении 40 м и упиралось в сифон. Вход в колодец № 3А располагался в 8 м к северу от входа в колодец № 3, и потому он вскрыл нижнюю обводненную часть колодца № 3. Место прихода колодца № 3 было видно по восходящим колодцам. В колодце № 3А протяженность обводненной части сократилась по сравнению с колодцем № 3. В 2010 г. входной колодец глубиной около 35 м переходил в круто наклонный ход длиной 12,5 м, что соответствовало вертикальному превышению в 10,4 м, и далее в вертикальный колодец глубиной 4,5 м, заканчивающийся озером диаметром около 3 м. Общая глубина колодца составляла 50 м. Колодец был мертвым, в него попадала вода только из коры таяния льда. В дальнейшем колодец был залит водой и начал зарастать.

Колодец № 3Б (координаты: 77,97833° — 14,06429° — 254 м н. у. м.). Неподалеку от колодца № 3 выше по течению ручья в 2010 г. возник небольшой новый

колодец. Входной колодец глубиной 45 м приводил на дно, засыпанное фирнизированным снегом, с двумя водобойными ямами и интенсивной капелью. Ширина колодца на дне составила 1 м, протяженность площадки около 4 м. Со дна колодца примерно на восток шел меандрирующий канал шириной 0,3–0,4 м и высотой до 15 м. В результате искусственного расширения канала удалось преодолеть три петли меандра, т. е. около 20 м канала с общим перепадом высоты около 2 м. Далее из-за узости канала (около 20 см) пройти не удалось. Стены канала были сложены чистым крупнозернистым льдом (кристаллы от 2 до 10 см в поперечнике) без воздушных пузырьков. Во льду изобиловали мелкие включения глины (до 1 мм в поперечнике). В 2013 г. колодец перешел в разряд заросших (залеченных).

Во всех трех группах колодцев наблюдается похожая картина: на каждый конкретный момент имелась череда колодцев от заросших через отмершие к активным. Каждый активный колодец рано или поздно терял водное питание, отмирал, начинал заполняться снегом и льдом или водой, переходя в разряд заросших (залеченных). Для группы колодцев № 3 характерен последовательный переход от заросших колодцев к активным снизу вверх по леднику. Поскольку колодцы возникают по трещинам, это означает последовательное возникновение трещин и мест поглощения воды в одних и тех же местах при смещении льда вниз по леднику. Сложнее ситуация проявляется в группе колодцев № 2, где на последовательный ряд отступания колодцев накладываются местные возмущения, когда блуждающий поток может восстановить целый ряд отмерших и заросших колодцев, расположенных вокруг. В группе колодцев № 1 новый колодец возник ниже отмершего, что может говорить об изменении структуры трещиноватости льда в этой части ледника.

Для каждой группы было характерно общее направление развития сети каналов от основания входного колодца. Для группы № 1 это восток–северо-восток, т. е. по направлению движения льда, а для групп колодцев № 2 и № 3 это север и северо-северо-восток. Также для каждой группы была типична глубина входного колодца. Для группы колодцев № 1 это 55–65 м, для группы колодцев № 2 — 70–75 м, для группы колодцев № 3 — 45–60 м. Близкая глубина входных колодцев во всех группах, скорее всего, говорит о примерно одинаковой толщине слоя холодного льда по всему леднику.

Ледниковые пещеры

Пещеры формируются на языке ледника и могут быть как внутриледными, так и подледными. Поскольку, согласно нашим полевым наблюдениям, язык ледника приморожен к ложу, то было не совсем понятно, как вода из теплого ядра ледника может выходить на язык ледника. Внутриледные каналы могут возникать только по трещинам, поскольку лед в массиве ледника является водонепроницаемой породой [20–22], несмотря на то что на небольших образцах льда в лабораторных условиях получена проницаемость льда через межзерновые каналы [23]. Дренаж происходил через субгоризонтальные трещины, генезис которых мы обсудим позже. Врезание воды в нижнюю плоскость такой трещины приводило к формированию внутриледного пещерного канала, который при понижении базиса эрозии в дальнейшем мог превратиться в подледный.

Обследование языка ледника в августе–сентябре 2001–2021 гг. показало наличие ледниковых пещер. Самая значительная пещера, из которой летом вытекал

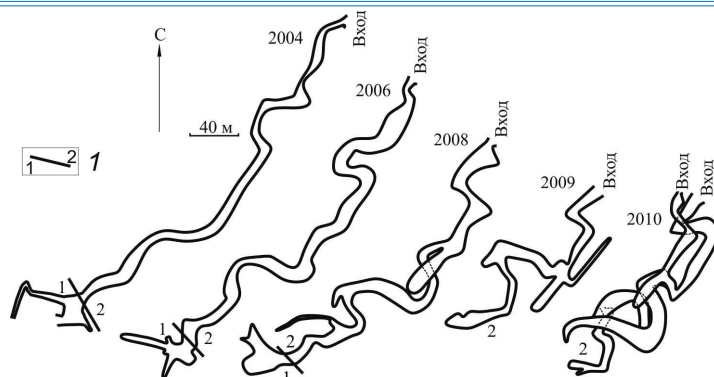


Рис. 6. Изменение пещеры на северной части языка ледника Альдегонда.

1 — подледная часть пещеры, 2 — внутриледная часть пещеры [7]

Fig. 6. Changing of the cave in the northern part of the Aldegondabreen tongue.

1 — subglacial part of the cave, 2 — englacial part of the cave [7]

поток 1000–1500 л/с, располагалась у левого борта ледника. В разные годы протяженность доступных галерей пещеры сильно варьировала. Разная протяженность галерей пещер была связана с двумя противоборствующими факторами: с отступанием края льда, сокращавшим протяженность пещер, и с прорастанием галерей пещер вверх по леднику или развитием в них меандров, увеличивающих протяженность каналов. Если в 2001 г. пещера была длиной всего 20 м, то уже на следующий год доступны были около 100 м галерей, несмотря на то что обследованный участок пещеры предыдущего года превратился в открытый водный поток. Но из-за быстрого отступления края льда эта полость была полностью уничтожена. В 2003 г. нам удалось проникнуть в субгоризонтальную щель вновь возникшей полости примерно на 250 м [11]. Максимальная протяженность галерей почти прямого неветвящегося врезанного в лед канала была характерна для пещеры в 2004 г. В последующие годы протяженность пещеры между крайними точками стала уменьшаться, хотя суммарная длина доступных галерей была еще велика (рис. 6). В 2011–2012 гг. произошло значительное сокращение протяженности пещерных галерей, и в 2013–2016 гг. были доступны лишь отдельные небольшие фрагменты ранее существовавшей полости. До 2019 г. полость была недоступна, но в 2019 г. ее новые фрагменты вскрывались в нескольких окнах выше по склону языка ледника. Однако теплая погода и обилие воды не позволили тогда обследовать эти участки полости. К 2021 г. край льда на языке ледника сильно отступил, в результате вскрылась новая пещера протяженностью более 70 м в виде горизонтальной щели во льду.

Следует добавить, что в разные годы пещера могла быть расположена только во льду (внутриледная полость) или подо льдом (подледная полость). Но были случаи, когда часть полости была внутриледной, а другая часть — подледной (табл. 2, см. рис. 6). Изменение формы полости происходило при понижении базиса эрозии перед ее входом, что было связано с размывом моренных и русловых отложений и льда под ними. Положение полости внутри льда способствовало тому, что при быстром понижении базиса эрозии у ее входа происходило врезание канала в лед так, что канал приобретал каньонобразную форму. При медленном понижении базиса эрозии

или при отсутствии понижения канал начинал меандрировать, его ширина увеличивалась. На некотором этапе происходило подрезание петли меандра, что вело к оседанию блоков льда и блокированию пещерных галерей. В дальнейшем такая блокада галерей могла получить обход или становилась непреодолимой преградой для посещения полости.

Таблица 2

Изменение размеров пещер на языке ледника Альдегонда в разные годы [7]

Table 2

Changing of caves dimensions on the Aldegondabreen tongue in different years [7]

Год	Положение пещеры на языке ледника	Координаты входа			Протяженность ходов, м	Ширина, м	Высота, м	Этажность полости	Расположение полости
		Широта, [°]	Долгота, [°]	Высота, м н. у. м.					
1982	середина*	77,98503	14,16322	40	—	—	3–3,5	трехэтажная	внутриледное
1983	середина	—	—	—	300	15	0,6–3,5	одноэтажная	—
1984	середина	—	—	—	120	5–12	2–4,5	одноэтажный меандр	подледное
1985	середина	—	—	—	—	—	—	—	подледное
1986	середина	—	—	—	500	—	—	—	внутриледное и подледное
2001	середина	77,98017	14,14317	60	50	10–12	0,2–1,2	одноэтажная	подледное
2001	слева	77,98544	14,12001	114	20	3–5	1,5	одноэтажная	подледное
2002	середина	77,98019	14,14003	61	120	3–4	0,5–4	одноэтажная	подледное
2002	слева	77,98217	14,12169	116	100	4–6	0,5–0,9	одноэтажная	подледное
2003	середина	77,98220	14,12175	139	113	4–8	0,8–7	одноэтажная	подледное
2003	слева	77,98211	14,12128	118	250	10	0,5–2	одноэтажная	подледное и внутриледное
2004	слева	77,98233	14,11508	136	536	2,5–16	0,5–3,5	одноэтажная	внутриледное и подледное
2005	слева	77,98233	14,11508	136	520	—	—	одноэтажная	внутриледное и подледное
2006	слева	77,98485	14,11090	139	506	5–16	0,3–5	одноэтажная	внутриледное и подледное
2007	слева	77,98097	14,11945	141	200	5–16	0,3–5	одноэтажная	внутриледное
2008	слева	77,98097	14,11945	141	578	1–20	0,25–5	двухэтажная	внутриледное и подледное
2009	слева	77,98460	14,10802	136	422	3–15	0,4–5	двухэтажная	внутриледное и подледное
2010	слева	77,98449	14,10951	136	613	2–17	0,4–3,5	многоэтажная	внутриледное
2013	слева	77,98375	14,10627	139	40	5–6	2–2,5	одноэтажная	внутриледное
2014	слева	77,98401	14,10750	138	20	4–7	1	одноэтажная	внутриледное
2016	слева	77,98431	14,10927	138	15	6	1,6	одноэтажная	внутриледное
2017	справа	77,97481	14,14686	106	100	3–8	0,5	одноэтажная	подледное
2018	справа	77,97453	14,14464	108	100	7–12	0,5–2,5	одноэтажная	подледное
2019	слева	77,98247	14,09342	174	12	6	0,5–4	одноэтажная	подледное
2019	справа	77,97391	14,14505	112	30	8–10	0,5–1,5	одноэтажная	подледное
2021	слева	77,98193	14,09192	170	70	5–15	0,5–2	одноэтажная	внутриледное

Примечание: * — приблизительные оценочные координаты входа в пещеру.

ОБСУЖДЕНИЕ

Если посмотреть на полученные данные, то бросается в глаза, что наибольшее количество активных колодцев на леднике Альдегонда было отмечено в 2003–2006 гг. В дальнейшем количество активных ледниковых колодцев стало сокращаться, и в настоящее время на леднике крупными активными остались колодец № 2 и колодец № 1А, а также имела группа небольших колодцев вокруг последнего. Остальные колодцы превратились в заросшие. Что стало причиной этого, сказать трудно. Можно предположить, что ледник из-за постепенного сокращения толщины льда потерял большую часть нижнего слоя теплого льда, что типично для сокращающихся ледников на архипелаге Шпицберген. Сравнение данных наземных радиолокационных съемок 1999 и 2018–2019 гг. показало [13], что площадь ледника за эти годы сократилась на 23,1 % (от 6,94 до 5,34 км²), общий объем льда уменьшился на 36,4 % (от 0,437 до 0,278 км³), а средняя толщина льда — от 63 до 46 м. При этом площадь теплого ледяного ядра уменьшилась на 32,7 % (от 1,196 до 0,804 км²), его объем — на 42,5 % (от 0,437 до 0,278 км³), средняя толщина теплого льда сократилась от 29 до 25 м, а доля теплого льда в общем объеме ледника — с 8 до 7 %. В результате ледник стал преимущественно холодным [13], то есть его лед стал более жестким, скорость движения льда замедлилась, на леднике количество трещин сократилось, и, соответственно, стало меньше возможностей для формирования ледниковых колодцев. И поверхностные водотоки, которые ранее поглощались колодцами, стали стекать по льду до языка ледника. Этому не противоречит приуроченность оставшихся активных колодцев к южной части ледника, где по данным геофизических исследований [8, 13] отмечены самые большие мощности льда и у ложа присутствует слой теплого льда. Однако тут есть и некоторое противоречие. Дело в том, что в центральной части ледника у ледникового ложа также имеется слой теплого льда. Несмотря на это, из активных колодцев в этом районе остался только колодец № 2, а больше таких колодцев здесь нет. Это говорит о том, что предложенных причин сокращения числа активных колодцев на леднике явно недостаточно. Каковы эти причины, могут показать будущие исследования.

Интересным является вопрос выхода из ледника талых вод, которые поглощаются ледниковыми колодцами. Если на поверхности ледника вода поглощается в нескольких местах, то на языке ледника есть фиксированное количество выходов воды. Чаще всего с языка стекало 4 водных потока, два из которых имели поверхностный водосбор, а два других — подледный или внутриледный сток. Место выхода ледниковых вод определяли методом трассирования [12]. Оказалось, что все полости вокруг колодцев № 2 и № 3 дренируют воду в пещеру у левого борта ледника со скоростями около 0,1–0,26 м/с (без учета извилистости внутриледного водного потока). Однако окрашивание вод, текущих в колодец № 1, не позволило обнаружить место выхода краски на языке ледника. Ранее мы считали, что воды из всех ледниковых колодцев трассируются к источнику у левого (северного) борта ледника [4]. Однако результаты геофизических исследований [8, 13], а также визуальные наблюдения строения обнажившегося после отступления края льда ледникового ложа не позволяют настаивать на этом выводе. Наиболее логичным является утверждение, что вода из группы колодцев № 1 выходит из источника у правого (южного) борта ледника. В том же направлении развиваются и меандры этих колодцев. Но прямых доказательств связи колодца № 1 и выхода воды у правого борта ледника, кроме

геофизических наблюдений [8, 13], до сих пор не получено. Казалось бы, все ясно — вода из группы колодца № 1А выходит у правого борта. Но тут есть одна загвоздка. Дело в том, что ледник подстилается пачкой почти вертикально стоящих пермских известняков с прослоями гипсов. А это означает, что в стоке из ледника Альдегонда могут принимать участие карстовые воды. Карстовые каналы под ледником могут как поглощать часть ледникового стока, так и добавлять в ледниковый сток порцию карстовых вод, поступающую с более высоких территорий. Могут происходить и оба процесса сразу, если они разнесены под поверхностью ледника. О возможности поглощения части вод карстовыми каналами под ледником Альдегонда сделано предположение в работе [24].

Что касается пути движения внутриледных или подледных вод внутри ледника Альдегонда, то судить об этом трудно, поскольку на данный момент нет ни одного случая спелеологического прохождения на этом леднике через всю дренажную систему. Как правило, все каналы, пройденные на дне ледниковых колодцев, имеют небольшую протяженность (не более 150 м) и заканчиваются сифонами. Пещеры, изученные на языке ледника, также не могут дать богатый материал о строении каналов под толщей льда. В некоторых случаях эти каналы частично или полностью недоступны, как это почти всегда происходит для канала у правого борта ледника. Проходимыми были только каналы в центре языка ледника и у его левого борта. Центральный канал был подледным и транзитным, в верхний вход поверхностный поток входил, а выходил из нижнего входа. Канал в левой части ледника был подледным на скальных выступах ложа ледника (ригелях), но становился внутриледным между скальными выступами. Поскольку протяженность каналов составляла первые сотни метров, то нам известно строение от четверти до трети всей протяженности внутренней дренажной системы, а преобладающая ее часть является недоступной, и ее строение неизвестно. Из строения пещеры на языке ледника и того факта, что все исследованные пещерные каналы в основании ледниковых колодцев не достигали ложа ледника, мы сделали заключение, что в основании ледника вода, скорее всего, движется не по каналу, а в виде тонкого слоя по приоткрытой плоскости тектонического надвига. Он располагается в нижней части толщи ледника и в некоторых местах на вершинах скальных выступов, возможно, касается ложа. По этому надвику происходит движение ледника, и по нему движется вода, поступающая из ледниковых колодцев [25]. По нашему мнению, во всей центральной и северной части ледника вода попадает на плоскость надвига вблизи дна ледниковых колодцев, которые полностью пробивают толщу холодного льда [9, 13, 14], и далее вода по этой плоскости движется на северо-восток до борта ледника, где она поворачивает на восток и далее течет вдоль борта ледника до выхода на его языке. По данным радиозондирования [14, рис. 5], отмечен внутриледниковый канал в толще холодного льда, проходящий на глубине, близкой к глубине ледниковых колодцев. Именно поэтому многие каналы в основании полостей в центральной и северной частях ледника являются субгоризонтальными. Эти каналы заложены в чистом льду, который типичен для нижних 10–20 м толщи льда шпицбергенских ледников и в котором нет воздушных пузырьков. Что касается ледниковых колодцев № 1 и № 1А, то они имели входной колодец глубиной 55–65 м, от основания которого вниз по леднику шел вертикально ориентированный щелевой субгоризонтальный канал, на некотором расстоянии от колодца (до 100 м) переходивший сначала в каскад небольших колодцев глубиной

1–3 м, а потом превращавшийся в трубообразный фреатический канал диаметром до 2 м. Чаще всего канал был заполнен водой, что говорило о подпруживании дренажной системы. О том, что колодцы могут быть подпружены в летнее время, говорит факт отмеченного уровня воды после окрашивания потока в колодце № 5 в июле 2006 г.

Исследования, проводимые в ледниковых колодцах регулярно, показали, что полости в ледниках быстро изменяются. Если колодец не терял водного питания или потерял его недавно, то сам он претерпевает минимальные изменения. Мы это видим на примере колодца № 1, который на протяжении 2002–2009 гг. имел постоянную глубину около 55 м. Но при этом происходило изменение конфигурации каналов, которое выражалось в спрямлении пещерных меандров. Наблюдалось одновременное врезание канала в лед и смыкание верхней части канала под действием пластической деформации. При этом скорость смыкания каналов увеличивалась от поверхности в глубь ледника. Если в вертикальной части ледникового колодца смыкания не происходило из-за того, что он был заложен в более жестком холодном льду, то в каналах, отходящих от низа колодцев, отмечалось сжатие, которое различалось в разных частях ледника. Если в отмершем колодце № 3 сжатие каналов достигало 2 м/год, то в колодце № 2 сжатие составляло около 1 м/год, а сжатие канала в колодце № 1 не превышало 0,3–0,7 м/год. Но в любом случае, если колодец терял водное питание, то очень быстро (за год-два) он смыкался в нижней части и постепенно начинал заполняться.

Следует заметить, что формирование новых трещин совсем не обязательно будет видно на поверхности ледника. В частности, в 2006 г. при прохождении круто наклонной части одного из ледниковых колодцев автор для большей устойчивости на крутом ледяном склоне ударом вбил зубья кошек на ногах в натечный лед пола канала. В ответ послышался сильный гул разрыва, и вблизи ноги автора возникла новая зияющая вертикальная трещина шириной около 10 см, которая не выходила на поверхность. Такой трещины вполне достаточно для начала формирования нового ледникового колодца внутри существующей полости.

Для 141 заросшего колодца на леднике Альдегонда в 2003 г. удалось выявить время зарастания, которое проявлялось в виде годовых слоев. Оказалось, что колодцы полностью зарастали за 1–6 лет. Самые мелкие колодцы (диаметр 0,1–0,8 м) зарастали за 1 год (27 штук, или 19,1 %), за 2 года — 56 колодцев диаметром 0,2–2 м (39,7 %), за 3 года — 38 колодцев диаметром 0,3–2 м (27 %), за 4 года — 13 колодцев диаметром 0,5–2 м (9,2 %), за 5 лет — 5 колодцев диаметром 1–3 м (3,6 %), за 6 лет — 2 колодца диаметром 1,5–2 м (1,4 %). В целом чем больше был средний диаметр колодца, тем дольше он зарастал. Среднее время зарастания колодцев оказалось равно 2,4 годам. Наиболее крупные колодцы, которые концентрировали большие потоки талых вод, возникали на леднике довольно редко, что связано с небольшим числом крупных водных потоков на поверхности ледника, чаще всего на леднике формировались небольшие колодцы, образующиеся на малых потоках. Это подтверждается как размерами входных отверстий активных и мертвых колодцев, так и диаметром заросших колодцев. Обилие мелких заросших колодцев (см. рис. 1) и их значительная разбросанность по поверхности ледника говорят о малых водосборах потоков, которые их формировали.

Сравнение ледника Альдегонда с другими ледниками показывает в некоторых случаях сходство, а в некоторых — различие. Например, в леднике Тавле два ис-

следованных колодца глубиной около 100 м достигли ледникового ложа, но почти не имели продолжения под ледником [26]. И только один канал, врезанный каньоном с поверхности, находился примерно на одной и той же глубине около 30–35 м. К сожалению, из-за нехватки снаряжения он не был исследован до конца. На языке ледника другой неглубокий колодец (15 м) проникал прямо на ложе ледника. На леднике Лонгйир каньон поверхностного водного потока, врезанный в лед, не достигал ложа, но был захоронен, превратившись в пещерный канал. Ледниковый колодец глубиной около 30 м возник здесь по захороненному ледяному каньону. После вертикального каскада или вертикального колодца на леднике Брёггер началась субгоризонтальная часть полости [2], которая была внутриледной, как и на леднике Альдегонда. На соседнем леднике Ловен Средний также вертикальная часть полости завершалась внутриледным каналом [27], а вода на языке ледника вытекала из субгоризонтального канала [28], как это наблюдалось многие годы на леднике Западный Грёнфьорд, расположенном к югу от ледника Альдегонда. В дальнейшем по этой трещине возник субгоризонтальный внутриледный канал с плоским сводом.

Особняком стоят небольшие холодные ледники, в которых врезанный с поверхности ледяной каньон поверхностного водотока доходит до дна и превращается в подледный канал. Это возможно только при толщине льда не более 30–35 м. В противном случае такой канал обязательно будет либо перекрыт пластической деформацией, либо блокирован наледями или снежной шугой, поступающей с поверхности с водными потоками при таянии снега в весеннее время.

Как видим, для политермических ледников, к каким относится ледник Альдегонда, для ледниковых колодцев характерно наличие вертикального входного колодца, который пробивает слой холодного льда [9, 13, 14], и субгоризонтальной части, которая расположена вблизи ложа ледника внутри прозрачного придонного льда. Похожая ситуация была отмечена для Кристальной пещеры (Crystal Cave) на леднике Ханс, Шпицберген [21, 29]. Для ледника Брёггер, Шпицберген, подобная структура внутреннего дренажа с колодцем и субгоризонтальным каналом была выявлена спелеологическими и георадиолокационными методами [2, 17, 30], причем последние позволили оценить положение и глубину непройденных внутриледниковых каналов, их диаметр и степень заполнения водой. Данные радиозондирования по вертикальным сериям гиперболических отражений на ледниках Западный и Восточный Грёнфьорд и Фритьоф выявили и позволили нанести на карту системы трещин и ледниковых колодцев, проникающих с поверхности и из толщи холодного льда до теплого льда, а в некоторых случаях и до ложа [31].

Приуроченность активных, мертвых и заросших ледниковых колодцев к средней части ледника и отсутствие их следов в районе языка ледника может говорить о том, что основные перегибы ложа, определяющие трещиноватость льда в этом малоподвижном леднике, расположены именно в этой части ледника. Возможно также, что следы ранее существовавших колодцев, которые были расположены на леднике ниже существующих, попросту были полностью срезаны абляцией поверхности льда. О такой возможности говорило наличие нескольких «муравьиных куч», которые были встречены близ языка ледника в начале 2000-х гг. и могли быть свидетельствами присутствия ледниковых колодцев. Если это действительно были полностью уничтоженные колодцы, то положение надвигов, контролирующих дренаж от основания ледниковых колодцев, должно зависеть от состояния ледника, его

размеров и соотношения с выступами ложа. То есть для каждого состояния ледника будет характерно свое положение надвигов. В таком случае внутренняя дренажная система ледника будет перестраиваться в зависимости от состояния ледника.

По данным геофизических работ, проведенных на леднике Альдегонда в 2018–2020 гг. [13], и гидрохимических исследований 2020 г. были сделаны выводы о строении внутренней дренажной сети, согласно которым были выделены основные каналы движения талых вод: 2 подледниковых в области холодного льда и 2 внутриледниковых вблизи области теплого льда [14]. Называя каналы в северной части ледника подледниковыми, авторы сами себе противоречат, поскольку по их же гидрохимическим исследованиям у них получилось, что состав воды, поглощаемой в колодце № 2, не отличается от состава воды на ее выходе на языке у левого (северного) борта ледника. Это возможно только в том случае, если весь путь вода проходит внутри льда и не имеет контакта с ложем. Возможно, точность георадарных измерений не позволяет отличить подледное положение канала от внутриледного, если канал расположен вблизи ложа ледника. Вызывает некоторое сомнение наличие второго канала на леднике, поскольку никаких явных крупных выходов воды на языке в центральной части ледника обнаружено не было. Кроме того, все колодцы группы № 2 при окрашивании вод показали выход воды у северного борта ледника. Предполагаемая в работе [14] по геофизическим данным глубина группы колодцев № 2 оценивается примерно в 52–55 м (по радарограммам в статье видно, что оцениваемая глубина близка к 40 м), хотя в действительности она равна 70–75 м, что близко к общей толщине льда, оцененной в 75–80 м. При этом при исследованиях общая глубина полостей, связанных с группой колодцев № 2, с учетом слоя стаявшего льда к настоящему времени не превышала 70 м. Не исключено, что ошибка может быть связана с заполнением водой нижних частей колодцев во время георадиолокационной съемки. На рис. 1 показаны положения внутренних каналов ледника Альдегонда, предполагаемые нами на основании использования данных обследованных нижних частей колодцев, а также положения активных, мертвых и заросших колодцев на поверхности ледника.

Сравнение нашей схемы внутреннего дренажа ледника со схемой в работе [14] показывает различие как по данным георадиолокации, так и по данным, полученным при оценке гидравлического потенциала на леднике. Поскольку георадиолокационная съемка является не площадной, а профильной, то при интерпретации полученных данных возможно объединение выявленных в разных профилях обособленных полостей в одну систему. Возможно, это стало причиной появления параллельных каналов дренажа у левого и правого борта ледника [14]. Что касается попыток построения каналов внутреннего дренажа по гидравлическим потенциалам, то вряд ли эти данные являются вполне достоверными, поскольку сравнение исследованных пещерных каналов на леднике Ханс на Шпицбергене показало существенное различие с сетью каналов, построенных по гидравлическим потенциалам [32], хотя ранее в работе [33] было показано неплохое совпадение положения рассчитанных по гидравлическим потенциалам подледниковых каналов ледников Ханс и Вереншельд с положением ледниковых колодцев и выходов подледниковых потоков на языках ледников. Использование этого метода на леднике Альдегонда вряд ли оправдано, поскольку он работает для подледных каналов, а на леднике Альдегонда по нашим и геофизическим данным [14] дренажные каналы являются преимущественно внутриледными.

Основной проблемой формирования ледниковых колодцев является вопрос, куда вода движется от основания первичной трещины, а впоследствии от дна входного колодца. Вернее, на приведенных примерах мы видим путь движения воды от дна входного колодца в виде субгоризонтальных или слабо наклонных галерей, но неизвестно, как этот путь образовался. Теория гидроразрыва предполагает, что трещина, по которой формируются колодцы, доходит до ложа ледника [21, 22, 34]. Вода смачивает ложе, из-за чего ледник весной с началом снеготаяния начинает двигаться быстрее. Однако не на всех ледниках вода проникает в колодцах до ложа (примеры: ледники Альдегонда, Брёггер, Ловен Средний и др.), а значит, и не смазывает ложе. Кроме того, по трещинам гидроразрыва, если они заполнены водой, ледниковые колодцы формироваться не могут, поскольку требуют для своего образования заполненного воздухом пространства трещин [19]. Возможно, представление о том, что колодцы проникают до ложа ледника, идет от первых исследователей ледников в Альпах в первой половине XIX в., которые были уверены в этом и даже спускали в колодцы на веревке молотки с привязанным куском сала, чтобы увидеть, как к нему прилипнет подледный грунт [35, 36].

Поэтому оставалось неясным, куда девается вода из колодцев, когда они не доходят почти до ложа ледника. Одна из идей предполагала, что вода от основания колодца расходится по межзерновым канальцам, имеющим сечение в доли миллиметра [37]. Предполагалось, что эти канальцы пронизывают всю толщу ледника. Посещение ледниковых колодцев и пещер показало, что межзерновых канальцев в толще льда нет, а даже если бы они и были, то проницаемость их для воды была бы просто ничтожной и поглотить никакой водный поток они не были бы способны. По результатам наблюдений, вода в леднике может перемещаться по вертикальным трещинам, которые могут объединяться в единую систему [38–40], а по наблюдениям в теплом льду на леднике Стур в Швеции [20] было показано, что даже небольшие субвертикальные трещины служат путями движения воды в толще льда. Но трещины на ледниках есть не везде, поэтому такой механизм работает только на ограниченных участках ледников, и непонятно, как превратить их в единую систему, позволяющую воде двигаться к языку ледника, формируя дренажные каналы.

Поскольку толща теплого льда в северной части ледника Альдегонда располагается тонким слоем только вблизи ложа ледника [8, 13], то выходом из создавшегося положения нам видится формирование субгоризонтальных надвигов в толще льда вблизи контакта холодного и теплого льда, по которым, собственно, и движется ледник [11, 25]. Именно попадая на эту плоскость скольжения, т. е. на плоскость надвига, вода под давлением пленкой растекается по плоскости, активизирует движение ледника, а потом в течение летнего сезона формирует вдоль этой плоскости каналы в толще льда, которые по плоскости скольжения доходят до языка ледника. Если позволяет высота базиса эрозии на языке ледника в месте выхода воды, то внутриледный канал может врезаться в ложе ледника и стать подледным, если не позволяет — он остается внутриледным.

На примере ледника Альдегонда на Шпицбергене мы рассмотрели элементы внутренней дренажной системы, обследованные в течение периода с 2001 по 2021 гг., и не нашли среди ледниковых колодцев ни одного, достигшего ложа ледника. Но ледниковые пещеры, формирующиеся на языке ледника Альдегонда, позволили показать, что они образовались именно по внутриледным плоскостям надвигов [7]. Все это

вместе позволяет нам считать идею формирования внутреннего дренажа ледников по внутренним надвигам наиболее вероятной. Она объясняет многие элементы строения систем внутреннего дренажа ледников, а также прорывы ледниковых озер, сёрджи и формирование озов. Поскольку надвиг в центральной части ледника располагался внутриледно, что было видно по внутриледному расположению каналов в основании ледниковых колодцев и малому количеству обломочного материала, за исключением приносимого с поверхности ледника, а ближе к языку ледника плоскость надвига местами начинала касаться вершин скальных выступов, что наблюдалось в пещере на языке ледника, то к материалу, переносимому потоком в пещерном канале, присоединялся обломочный материал, смываемый со скальных выступов. Именно этот материал мог создавать основу для формирования озов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2001–2021 гг. на леднике Альдегонда были проведены спелеологические исследования элементов внутреннего дренажа (ледниковых колодцев и пещер). Для большинства активных ледниковых полостей в средней части ледника типичны входные колодцы, чья глубина сравнима с толщиной холодного льда на леднике, т. е. равна 50–75 м, что типично для политермических ледников. На леднике выделяются три группы активных колодцев, каждая из которых имеет общую схему развития от активных колодцев через мертвые до заросших (залеченных). Но у каждой группы есть свои особенности. Большинство ледниковых колодцев имеет наклонное или субгоризонтальное продолжение. В группе колодцев № 1 продолжение ориентировано на восток–северо-восток, а в группах № 2 и № 3 — на северо-северо-восток, что определяет направление транзита вод от колодцев до края ледника. Стволы входных колодцев групп № 2 и № 3 достигают слоя прозрачного льда без пузырьков воздуха, который находится в основании ледника. Ни один из исследованных на леднике колодцев не достигает его ложа. Для групп колодцев № 2 и № 3 методом окрашивания доказан сток к левому борту ледника. Сток воды из колодцев группы № 1 предполагается на языке у правого борта ледника. Количество активных и мертвых колодцев на леднике стало уменьшаться с 2003 г., что, возможно, связано с сокращением площади распространения теплого льда в основании ледника при непрерывном сокращении толщины льда в результате потепления климата. Среди заросших колодцев преобладают те, которые имеют небольшие размеры, что говорит о том, что в недалеком прошлом активных колодцев на леднике было много и поглощение поверхностного стока в колодцы происходило не в концентрированном виде, как это характерно для настоящего времени. Система активных, мертвых и заросших колодцев пространственно разбивается на две группы. На основании исследования пещер на языке ледника предполагается, что субгоризонтальные нижние участки каналов, отходящих от нижних частей входных колодцев, образовались по или вблизи плоскостей движения по внутриледным надвигам. Полученные результаты могут помочь в интерпретации геофизических данных.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках темы государственного задания Института географии РАН АААА-А19-119022190172-5 (FMGE-2019-0004) и государственного задания FMWS-2022-0002.

Благодарности. Автор выражает благодарность всем спелеологам, которые помогали в исследовании ледниковых колодцев и пещер на леднике.

Competing interests. The author declares the absence of competing interests.

Funding. The study was carried out within the framework of the state task of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences AAAA-A19-119022190172-5 (FMGE-2019-0004) and the state task FMWS-2022-0002.

Acknowledgments. The author expresses his gratitude to all speleologists who helped in the study of moulins and glacial caves on the glacier.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Schroeder J.* Hans Glacier moulins observed from 1988 to 1992, Svalbard // *Norsk Geografisk Tidsskrift*. 1998. V. 52. P. 79–88.
2. *Vatne G.* Geometry of englacial water conduits, Austre Broggerbreen, Svalbard // *Norsk Geografisk Tidsskrift*. 2001. V. 55. P. 85–93.
3. *Gulley J.D., Benn D.I., Screaton E., Martin J.* Mechanisms of englacial conduit formation and their implications for subglacial recharge // *Quaternary Science Reviews*. 2009. V. 28. P. 1984–1999.
4. *Мавлюдов Б.Р.* Внутренние дренажные системы ледников. М.: Институт географии РАН, 2006. 396 с.
5. *Мавлюдов Б.Р., Кудиков А.В.* Изменение ледника Альдегонда с начала XX века // *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2018. № 3 (10). С. 152–162.
6. *Holmlund E.S.* Aldegondabreen Glacier change since 1910 from structure-from-motion photogrammetry of archived terrestrial and aerial photographs: utility of a historic archive to obtain century-scale Svalbard glacier mass losses // *Journal of glaciology*. 2021. V. 67 (261). P. 107–116.
7. *Мавлюдов Б.Р.* Пещеры на языке ледника Альдегонда, Шпицберген // *Спелеология и спелеология*. 2021. № 3. С. 7–16.
8. *Василенко Е.В., Глазовский А.Ф., Мачерет Ю.Я., Наварро Ф.Х., Токарев М.Ю.* Радиофизические исследования ледника Альдегонда на Шпицбергене в 1999 г. // *Материалы гляциологических исследований*. 2001. Вып. 90. С. 86–99.
9. *Mavlyudov B.R., Solovyaynova I.Yu.* Comparison of cold and temperate glacier caves // 6th International Symposium “Glacial Caves and Karst in Polar Regions” (3–8 September 2003, Ny-Alesund; Svalbard, Lat. 79°N). Madrid: SEDECK, 2003. P. 157–162.
10. *Мавлюдов Б.Р.* Внутренний дренаж ледника Альдегонда (Шпицберген) // *Проблемы морской палеоэкологии и биогеографии в эпоху глобальных изменений. Комплексные исследования природы Шпицбергена*. Вып. 9. М.: ГЕОС, 2009. С. 314–325.
11. *Mavlyudov B.R.* About new type of subglacial channels, Spitsbergen // *Glacier Caves and Glacial Karst in High Mountains and Polar Regions* / Ed. B.R. Mavlyudov. Moscow: Institute of geography RAS, 2005. P. 54–60.
12. Изучение метеорологического режима и климатических изменений в районе архипелага Шпицберген // *НТО об экспедиции «Шпицберген-2006»*, нач. эксп. И.Ю. Соловьянова. СПб., 2006. 210 с. Фонды ААНИИ. Инв. № Р-5607.
13. *Борисик А.Л., Новиков А.Л., Глазовский А.Ф., Лаврентьев И.И., Веркулич С.Р.* Строение и динамика ледника Альдегонда (Западный Шпицберген) по данным повторных георадиолокационных исследований 1999, 2018 и 2019 годов // *Лед и снег*. 2021. № 61 (1). С. 26–37.
14. *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. Т. 67. № 1. С. 67–88.
15. *Илюхин В.В., Дублянский В.Н., Лобанов Ю.Е.* Методика описания пещер. М.: Центральное рекламно-информационное бюро «Турист», 1980. 64 с.

16. Мавлюдов Б.Р. Новый тип ледниковых колодцев // История освоения Шпицбергена и Северной Евразии: Тезисы докладов конференции, посвященной 250-летию русской научной экспедиции на Шпицбергене под руководством В.Я. Чичагова (1765–1766). М.: Изд-во ООО «ТАУС», 2015. С. 31–33.
17. Vatne G., Irvine-Fynn T.D.L. Morphological dynamics of an englacial channel // Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. 2015. V. 12. P. 7615–7664.
18. Tsai V.C., Rice J.R. A model for turbulent hydraulic fracture and application to crack propagation at glacier beds // Journal of Geophysical Research. 2010. V. 115. F03007. doi: 10.1029/2009JF001474.
19. Badino G. Ice shaft genesis: a simple numerical approach // Proceedings of 2nd International Symposium “Glacier Caves and Karst in Polar regions, February” 10–16, 1992, Midzygorze, Poland. Sosnowies: Silesia University, 1992. P. 21–27.
20. Fountain A.G., Jacobel R.W., Schlichting R., Jansson P. Fractures as the main pathways of water flow in temperate glaciers // Nature. 2005. V. 433 (7026). P. 618–621.
21. Benn G., Evans D.J.A. Glaciers and Glaciation. 2 ed. London: Hodder Education, 2010. 802 p.
22. Cuffey K.M., Paterson W.S.B. The Physics of Glaciers. 4 ed. Amsterdam, etc.: Academic Press, 2010. 704 p.
23. Fowler J., Iverson N. A permeameter for temperate ice: First results on permeability sensitivity to grain size // Journal of Glaciology. 2022. V. 68 (270). P. 764–774. doi:10.1017/jog.2021.136.
24. Misztal S., Pulina M. Investigations of glacier caves // Field investigations performed during the Glaciological Spitsbergen Expedition in 1983. Interim report / Eds: J. Jania, M. Pulina. Uniwersytet Śląski Katowice, 1983. P. 26–33.
25. Mavlyudov B.R. Internal drainage of glaciers and its origin // Eds.: Land L., Kern Z., Maggi V., Turri S. Proceedings of the Sixth International Workshop on Ice Caves, August 17–22, Idaho Falls, Idaho, USA: NCKRI Symposium 4. Carlsbad (NM): National Cave and Karst Research Institute, 2014. P. 50–58.
26. Мавлюдов Б.Р. Исследования ледника Тавле и его внутренних дренажных каналов, Земля Норденшельда, Шпицберген // Комплексные исследования природы Шпицбергена. Вып. 7. Апатиты: КНЦ РАН, 2007. С. 187–201.
27. Griselin M. In the depth of a small polar glacier (Loven East Glacier, Spitsbergen) // Proceedings of 2nd International Symposium “Glacier Caves and Karst in Polar regions”, February 10–16, 1992, Midzygorze, Poland. Sosnowies: Silesia University, 1992. P. 51–63.
28. Irvine-Fynn T.D.L., Hodson A.J., Kohler J., Porter P.R., Vatne G. Dye tracing experiments at Midre Lovénbreen, Svalbard: preliminary results and interpretations // Mavlyudov B.R., ed. Proceedings of 7th GLACKIPR Symposium “Glacier Caves and Glacial Karst in High Mountains and Polar Regions”. Moscow: Institute of geography RAS, 2005. P. 36–43.
29. Benn D., Gulley J., Luckman A., Adamek A., Glowacki P. Englacial drainage systems formed by hydrologically driven crevasse propagation // Journal of Glaciology. 2009. V. 55 (191). P. 513–523.
30. Stuart G., Murray T., Gamble N., Hayes K., Hodson A. Characterization of englacial channels by ground-penetrating radar: An example from Austre Brøggerbreen, Svalbard // Journal of Geophys. Research. 2003. V. 108. Iss. B11. 2525. doi: 10.1029/2003JB002435.
31. Мачерет Ю.Я., Глазовский А.Ф., Лаврентьев И.И., Марчук И.О. Распределение холодного и теплого льда в ледниках на Земле Норденшельда (Шпицберген) по данным наземного радиозондирования // Лед и снег. 2019. № 2 (59). С. 149–166. doi: 10.15356/2076-6734-2019-2-430.
32. Gulley J.D., Grabiec M., Martin J.B., Jania J., Catania G., Glowacki P. The effect of discrete recharge by moulins and heterogeneity in flow-path efficiency at glacier beds on subglacial hydrology // Journal of Glaciology. 2012. V. 58 (211). P. 926–940. doi: 10.3189/2012JoG11J189.
33. Pälli A., Moore J. C., Jania J., Kolondra L., Glowacki P. The drainage pattern of Hansbreen and Werenskiöldbreen, two polythermal glaciers in Svalbard // Polar Research. 2003. V. 22. Iss. 2. P. 355–371. <https://doi.org/10.3402/polar.v22i2.6465>.

34. Das S.B., Joughin I., Behn M.D., Howat I.M., King M.A., Lizarralde D., Bhatia M.P. Fracture propagation to the base of the Greenland Ice Sheet during supraglacial lake drainage // *Science*. 2008. V. 320 (5877). P. 778–781.
35. Désor E. Excursions et séjour dans les glaciers et les Hautes Régions des Alpes. Neuchatel: Kissling, 1844. 638 p.
36. Forbes J.D. Travels through the Alps of Savoy and other parts of the Pennine Chain with observations on the phenomena of glaciers. Second ed. Edinburgh: A.&Ch. Black, 1845. 460 p.
37. Глазовский А.Ф., Красс М.С., Мачерет Ю.Я. Гидротермический режим и внутренний тепломассообмен в двухслойных ледниках // *Материалы гляциологических исследований*. 1999. Вып. 86. С. 61–66.
38. Fountain A.G., Walder J.S. Water flow through temperate glaciers // *Reviews of Geophysics*. 1998. T. 36. № 3. P. 299–328.
39. Mavlyudov B.R. Problems of en- and subglacial drainage origin // *Actes du 3 Symposium International “Cavités glaciaires et cryokarst en régions polaires et de haute montagne”*, Chamonix-France, 1–6.XI.1994. *Annales littéraires de l’université de Besançon*, N 561, serie *Geographie*, N 34, ed. M. Griselin. Besançon, 1995. P. 77–82.
40. Irvine-Fynn T.D.L., Hodson A.J., Moorman B.J., Vatne G., Hubbard A.L. Polythermal glacier hydrology: a review // *Reviews of Geophysics*. 2011. V. 49. RG4002, 1–37. doi: 10.1029/2010RG000350.

REFERENCES

1. Schroeder J. Hans Glacier moulines observed from 1988 to 1992, Svalbard. *Norsk Geografisk Tidsskrift*. 1998, 52: 79–88.
2. Vatne G. Geometry of englacial water conduits, Austre Broggerbreen, Svalbard. *Norsk Geografisk Tidsskrift*. 2001, 55: 85–93.
3. Gulley J.D., Benn D.I., Scream E., Martin J. Mechanisms of englacial conduit formation and their implications for subglacial recharge. *Quaternary Science Reviews*. 2009, 28: 1984–1999.
4. Mavlyudov B.R. *Vnutrennie drenazhnye sistemy lednikov*. Internal drainage systems of glaciers. Moscow: Institut geografii RAN, 2006: 396 p. [In Russian].
5. Mavlyudov B.R., Kudikov A.V. Aldegonda glacier change since the early 20th century. *Vestnik Kola nauchnogo tsentra RAN*. Bulletin of the Kola Science Center RAS. 2018, 3 (10): 152–162. [In Russian].
6. Holmlund E.S. Aldegondabreen Glacier change since 1910 from structure-from-motion photogrammetry of archived terrestrial and aerial photographs: utility of a historic archive to obtain century-scale Svalbard glacier mass losses. *Journal of glaciology*. 2021, 67 (261): 107–116.
7. Mavlyudov B.R. Caves on the Aldegonda Glacier tongue, Spitsbergen. *Speleologiya i speleostologiya*. Speleology and speleostology. 2021, 3: 7–16. [In Russian].
8. Vasilenko E.V., Glazovsky A.F., Macheret Yu.Ya., Navarro F.H., Tokarev M.Yu., Kalashnikov A.Yu., Miroshnichenko D.E., Reznikov D.S. Radiophysical studies of Aldegondabreen in Svalbard in 1999. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2001, 90: 86–99. [In Russian].
9. Mavlyudov B.R., Solovyanova I.Yu. Comparison of cold and temperate glacier caves. 6th International Symposium “Glacial Caves and Karst in Polar Regions” (3–8 September 2003, Ny-Alesund; Svalbard, Lat. 79°N). Madrid: SEDECK, 2003: 157–162.
10. Mavlyudov B.R. Internal drainage of Aldegonda Glacier (Spitsbergen). *Problemy morskoy paleoecologii i biogeografii v epokhu global’nykh izmenenij. Kompleksnye issledovaniya prirody Spitsbergena*. Problems of sea paleoecology and biogeography in epoch of global changes. Complex research of Spitsbergen nature. Moscow: GEOS, 2009, 9: 314–325. [In Russian].

11. Mavlyudov B.R. About new type of subglacial channels, Spitsbergen. *Glacier Caves and Glacial Karst in High Mountains and Polar Regions*. Ed. B.R. Mavlyudov. Moscow: Institute of geography RAS, 2005: 54–60.
12. *Izuchenie meteorologicheskogo rezhima i klimaticheskikh izmenenii v raione arkhipelaga Shpitsbergen: NTO ob ekspeditsii «Shpitsbergen-2005»*. Study of the meteorological regime and climatic changes in the Spitsbergen archipelago: scientific report. Expedition leader I.Iu. Solov'ianova. St. Petersburg, 2005: 157 p. Arctic and Antarctic Research Institute Repository. ID № P-5547. [In Russian].
13. Borisik A.L., Novikov A.L., Glazovsky A.F., Lavrentiev I.I., Verkulich S.R. The structure and dynamics of Aldegondabreen (West Spitsbergen) according to repeated radio-echo sounding data in 1999, 2018 and 2019 years. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2021, 1 (61): 26–37. doi: 10.31857/S2076673421010069. [In Russian].
14. Borisik A.L., Demidov V.E., Romashova K.V., Novikov A.L. Internal drainage network and characteristics of the Aldegondabreen runoff (West Spitsbergen). *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2021, 67 (1): 67–88. [In Russian].
15. Ilyukhin V.V., Dublyansky V.N., Lobanov Yu.E. *Metody opisaniya pesher*. Methods of caves describing. Moscow: Central Advertising and Information Bureau “Tourist”, 1980: 64 p. [In Russian].
16. Mavlyudov B.R. New type of moulins. History of Development of Spitsbergen and Northern Eurasia. Abstracts of the conference devoted to 250 anniversary of the first Russian Scientific expedition on Spitsbergen under the leadership of V.Ya. Chichagov (1765–1766). Moscow: Publ. house TAUS, 2015: 69–71.
17. Vatne G., Irvine-Fynn T.D.L. Morphological dynamics of an englacial channel. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 2015, 12: 7615–7664.
18. Tsai V.C., Rice J.R. A model for turbulent hydraulic fracture and application to crack propagation at glacier beds. *Journal of Geophysical Research*. 2010, 115: F03007. doi: 10.1029/2009JF001474.
19. Badino G. Ice shaft genesis: a simple numerical approach. *Proceedings of 2nd International Symposium “Glacier Caves and Karst in Polar regions”*, February 10–16, 1992, Midzygorze, Poland. Sosnowies: Silesia University, 1992: 21–27.
20. Fountain A.G., Jacobel R.W., Schlichting R., Jansson P. Fractures as the main pathways of water flow in temperate glaciers. *Nature*. 2005, 433 (7026): 618–621.
21. Benn G. Evans D.J.A. *Glaciers and Glaciation*. 2 ed. London: Hodder Education, 2010: 802 p.
22. Cuffey K.M., Paterson W.S.B. *The Physics of Glaciers*. 4 ed. Amsterdam, etc.: Academic Press, 2010: 704 p.
23. Fowler J., Iverson N. A permeameter for temperate ice: First results on permeability sensitivity to grain size. *Journal of Glaciology*. 2022, 68 (270): 764–774. doi:10.1017/jog.2021.136.
24. Misztal S., Pulina M. Investigations of glacier caves. Field investigations performed during the Glaciological Spitsbergen Expedition in 1983. Interim report. Eds: J. Jania, M. Pulina. Uniwersytet Śląski Katowice, 1983: 26–33.
25. Mavlyudov B.R. Internal drainage of glaciers and its origin. Eds: Land L., Kern Z., Maggi V., Turri S. *Proceedings of the Sixth International Workshop on Ice Caves*, August 17–22, Idaho Falls, Idaho, USA: NCKRI Symposium 4. Carlsbad (NM): National Cave and Karst Research Institute, 2014: 50–58.
26. Mavlyudov B.R. Researches of Tavle Glacier and its internal drainage channels, Nordenskiöld Land, Spitsbergen. *Kompleksnye issledovaniya prirody Spitsbergena*. Complex research of Spitsbergen nature. Apatity: CSC RAS, 2007, 7: 187–201. [In Russian].
27. Griselin M. In the depth of a small polar glacier (Loven East Glacier, Spitsbergen). *Proceedings of 2nd International Symposium “Glacier Caves and Karst in Polar regions”*, February 10–16, 1992, Midzygorze, Poland. Sosnowies: Silesia University, 1992: 51–63.

28. Irvine-Fynn T.D.L., Hodson A.J., Kohler J., Porter P.R., Vatne G. Dye tracing experiments at Midre Lovénbreen, Svalbard: preliminary results and interpretations. Mavlyudov B.R., ed. Proceedings of 7th GLACKIPR Symposium “Glacier Caves and Glacial Karst in High Mountains and Polar Regions”. Moscow: Institute of geography RAS, 2005: 36–43.
29. Benn D., Gulley J., Luckman A., Adamek A., Glowacki P. Englacial drainage systems formed by hydrologically driven crevasse propagation. *Journal of Glaciology*. 2009, 55 (191): 513–523.
30. Stuart G., Murray T., Gamble N., Hayes K., Hodson A. Characterization of englacial channels by ground-penetrating radar: An example from Austre Brøggerbreen, Svalbard. *Journal of Geophys. Research*. 2003, 108, B11: 2525. doi: 10.1029/2003JB002435.
31. Macheret Yu. Ya., Glazovsky A.F., Lavrentiev I. I., Marchuk I.O. Distribution of cold and temperate ice in glaciers on the Nordenskiöld Land, Spitsbergen, from ground-based radio-echo sounding. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2019, 2 (59): 149–166. doi: 10.15356/2076-6734-2019-2-430. [In Russian].
32. Gulley J.D., Grabiec M., Martin J.B., Jania J., Catania G., Glowacki P. The effect of discrete recharge by moulins and heterogeneity in flow-path efficiency at glacier beds on subglacial hydrology. *Journal of Glaciology*. 2012, 58 (211): 926–940. doi: 10.3189/2012JoG11J189.
33. Pälli A., Moore J. C., Jania J., Kolondra L., Glowacki P. The drainage pattern of Hansbreen and Werenskiöldbreen, two polythermal glaciers in Svalbard. *Polar Research*. 2003, 22 (2): 355–371. <https://doi.org/10.3402/polar.v22i2.6465>.
34. Das S.B., Joughin I., Behn M.D., Howat I.M., King M.A., Lizarralde D., Bhatia M.P. Fracture propagation to the base of the Greenland Ice Sheet during supraglacial lake drainage. *Science*. 2008, 320 (5877): 778–781.
35. Désor E. Excursions et séjour dans les glaciers et les Hautes Régions des Alpes. Neuchatel: Kissling, 1844: 638 p.
36. Forbes J.D. Travels through the Alps of Savoy and other parts of the Pennine Chain with observations on the phenomena of glaciers. Second ed. Edinburgh: A.&Ch. Black, 1845: 460 p.
37. Glazovsky A.F., Krass M.S., Macheret Yu. Ya. Hydrothermal regime and internal heat and mass transfer in two-layer glaciers. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1999, 86: 61–66. [In Russian].
38. Fountain A.G., Walder J.S. Water flow through temperate glaciers. *Reviews of Geophysics*. 1998, 36 (3): 299–328.
39. Mavlyudov B.R. Problems of en- and subglacial drainage origin. Ed. M. Griselin. Actes du 3 Symposium International “Cavités glaciaires et cryokarst en régions polaires et de haute montagne”, Chamonix-France, 1–6.XI.1994. Annales littéraires de l’université de Besançon, N 561, serie Géographie, 34, ed. M. Griselin. 1995, Besançon: 77–82.
40. Irvine-Fynn T.D.L., Hodson A.J., Moorman B.J., Vatne G., Hubbard A.L. Polythermal glacier hydrology: a review. *Reviews of Geophysics*. 2011, 49, RG4002: 1–37. doi: 10.1029/2010RG000350.