

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-1-67-88>  
УДК 551.321.61, 551.324.86, 551.328



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

## ВНУТРЕННЯЯ ДРЕНАЖНАЯ СЕТЬ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОДЛЕДНИКОВОГО СТОКА ЛЕДНИКА АЛЬДЕГОНДА (О. ЗАПАДНЫЙ ШПИЦБЕРГЕН)

А.Л. БОРИСИК, В.Э. ДЕМИДОВ, К.В. РОМАШОВА\*, А.Л. НОВИКОВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

\*hydrology2@aari.ru

### Резюме

С целью определения положения и гидрохимических характеристик поверхностных и внутренних дренажных каналов ледника были выполнены комплексные исследования, включавшие детальное георадиолокационное профилирование и гидрологическую съемку. Проанализированы материалы предшествующих работ по изучению дренажной сети и подледникового стока. По данным георадиолокации сделаны выводы о строении внутренней дренажной сети ледника, согласно которым выделены основные каналы движения талых вод: 2 подледниковых в области холодного льда и 2 внутриледниковых вблизи области теплого льда. Выдвинуты и обоснованы предположения об области питания внутриледниковых каналов в верховьях ледника и их дренировании в местах переуглублений. Показано изменение электропроводности и гидрохимического состава подледниковых выходов и реки Альдегонды на всем ее протяжении. Выявлена зона обогащения слабоминерализованных талых ледниковых вод гидрокарбонатно-кальциевого состава сильноминерализованными подземными водами сульфатно-кальциевого состава, поступающими из источников на ригеле перед фронтом ледника в центральной части долины реки Альдегонды.

**Ключевые слова:** внутренняя дренажная сеть, георадиолокационная съемка, ледник, минерализация, подледниковый сток, Шпицберген.

**Для цитирования:** 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. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-1-67-88>.

Поступила 13.11.2020

После переработки 02.02.2021

Принята 15.02.2021

## INTERNAL DRAINAGE NETWORK AND CHARACTERISTICS OF THE ALDEGONDABREEN RUNOFF (WEST SPITSBERGEN)

ALEKSANDR L. BORISIK, VASILIIY E. DEMIDOV, KSENIYA V. ROMASHOVA\*,  
ALEKSANDR L. NOVIKOV

State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic research Institute,  
St. Petersburg, Russia

\*hydrology2@aari.ru

### Summary

The polythermal Aldegondabreen is one of the most widely studied glaciers of the Nordenskjöld Land (Svalbard). However, the structure of its internal drainage network remains poorly understood. In order to determine the position and hydro-chemical characteristics of the surface and internal drainage channels of the glacier complex studies were carried out including ground penetrating radar (GPR) measurements and hydrological surveys. The GPR profiling performed in 2018–2020 identified four channels of internal drainage network, two of which are found along the northern side of the glacier in the area of cold ice and are subglacial. The other two are located in the area of temperate ice along the southern side of the glacier and are englacial, stretching at the cold-temperate surface. At the outlet grotto, the subglacial waters have a bicarbonate-calcium composition and low salinity (electrical conductivity 30–40  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), inherited from the surface meltwater streams that enter the moulins in the upper part of the glacier. No noticeable increase in mineralization occurs during the movement of the flow along the glacier bed. The englacial channels' waters at the outlet grotto have the same bicarbonate-calcium composition but a higher salinity (electrical conductivity 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), which we attribute to the filtration through the rocks of the riegel near the Aldegonda terminus, or, alternatively, to the influx of the groundwater at the same spot. Measuring the hydrochemistry of the Aldegonda river tributaries both on the glacier's surface, at the grottos and on the moraine in the valley made it possible to identify the zone of enrichment of the main volume of the low-mineralization glacial meltwater of bicarbonate-calcium composition by the high-mineralization (electrical conductivity up to 760  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) groundwater of sulphate-calcium composition coming from the springs on the riegel in front of the glacier's terminus in the central part of the Aldegonda Valley. Presumably, the springs are fed by the deep filtration of melted glacial waters along the Aldegonda subglacial talik.

**Keywords:** glacier, ground penetrating radar profiling, internal drainage network, mineralization, subglacial runoff, Svalbard.

**For Citation:** 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]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-1-67-88>.

Received 13.11.2020

Revised 02.02.2021

Accepted 15.02.2021

### ВВЕДЕНИЕ

Исследование дренажных систем ледников является важной составляющей их изучения, необходимой для понимания путей миграции воды в толще ледника и под ним. Дополняя данные об аккумуляции и абляции на поверхности ледника, оно позволяет учитывать внутреннее таяние и детализировать расчет приходных и расходных составляющих баланса его массы. Проникая в толщу ледника, вода увеличивает его температуру вследствие теплопереноса с поверхности, а также в результате ее повторного замерзания. Наличие воды в леднике является фактором, определяющим вязкость льда и скорость скольжения относительно ложа, что является важной информацией для прогнозирования периодических быстрых подвижек ледников [1, 2, 3, 4].

Использование метода георадиолокации для изучения внутренней дренажной сети ледников представляется перспективным, поскольку толща льда, имея низкое затухание электромагнитного сигнала, является практически «прозрачной» для него и, соответственно, неоднородности проявляются на георадиолокационных записях в виде отражающих или рассеивающих элементов. Также, в отличие от прямых спелеологических или индикаторных методов, использование георадара позволяет проследить каналы практически на всем их протяжении и, в особенности, в средней части ледника, куда, как правило, доступа у человека нет. Успешными примерами

таких работ на Шпицбергене являются исследования ледников Лонгйир [5], Телл [6] и Брёггер Восточный [7], где совместное применение прямых и дистанционных методов позволило проследить положение дренажных каналов, определить их заполненность водой, а также оценить их геометрические размеры.

Важным параметром выделения отражений, связанных с действующими каналами, является их интенсивность, вызванная высокой контрастностью диэлектрической проницаемости между льдом (или воздухом) и водой. При этом даже небольшое содержание воды во льду приводит к значительному увеличению коэффициента отражения и, соответственно, интенсивности отраженного сигнала [1]. Дополнительным параметром, характеризующим наличие обводнения канала, служит изменение полярности отраженного сигнала. В случае, когда канал полностью заполнен водой, отражение от его кровли будет иметь полярность, противоположную полярности падающей волны, что связано с отрицательным коэффициентом отражения на границе лед–вода. Если канал заполнен воздухом или заполнен водой лишь частично, то полярность сигнала от кровли канала останется неизменной [7]. В данной работе в основном рассматриваются геометрические параметры каналов (глубина до кровли и его пространственное положение), без учета динамических характеристик записи. Наличие обводнения определяется на качественном уровне по относительной яркости (интенсивности) гиперболических отражений, видимых невооруженным глазом.

Несмотря на кажущуюся простоту, применение георадиолокации имеет и ряд сложностей, включающих небольшой размер и сложную форму искомым объектов, наличие схожих отражений от локальных объектов (участков обводнения льда, включений моренного материала и т. д.), неравномерное промерзание каналов и многие другие [8]. Поэтому для уверенного прослеживания каналов необходима частая сеть наблюдений и высокая точность привязки получаемых георадиолокационных данных.

Прямые и дистанционные исследования ледника Альдегонда (о. Западный Шпицберген), и в том числе его дренажной сети, проводятся уже достаточно давно. Первые радиолокационные зондирования ледника, проведенные в 1974 г. с вертолета на частоте 440 МГц, позволили определить его толщину вдоль осевой линии и обнаружить внутренние отражения от границы между холодным и теплым льдом [9]. С развитием ледовых локаторов с цифровой регистрацией данных, позволяющих проводить измерения с наземного движущегося транспорта, в 1999 г. была выполнена подробная съемка ледника с использованием моноимпульсного радара ВИРЛ-2 с антенной 40 МГц и GPS-привязкой данных. В результате этих исследований удалось зафиксировать большее количество дифрагированных волн, сформированных теплым ядром ледника, а также выявить положение дренажного канала в южной части ледника [10]. Совместными усилиями сотрудников экспедиций ААНИИ и ИГРАН в 2001–2007 гг. исследования внутренней дренажной сети ледника Альдегонда были продолжены в части спелеологических [11] и гидрологических [12] наблюдений, которые внесли немалый вклад в понимание процессов, происходящих как внутри ледника, так и на выходе талых вод у его языка. В процессе этих работ были выделены и описаны водосборные бассейны ледника, действующие, мертвые и залеченные колодцы в верховьях ледника. Дополнительно были исследованы и картированы пещеры на расстояние до 500 м от входа, являющиеся выходами подледниковых вод,

в которых отмечено значительное меандрирование канала, а также выявлены притоки и оттоки подледниковых вод от основного рукава [3, 13]. Проведены измерения расходов воды в водотоках, вытекающих из-под ледника Альдегонда и являющихся продолжением подледниковых каналов. Отмечено, что водоток у левого борта ледника несет наибольшее количество воды [14]. Проведенные индикаторные эксперименты методом ионного паводка в колодцах, расположенных в центральной части ледника, позволили наметить направление основного канала, определить положение выхода воды из него и измерить скорость добегаания воды между входом и выходом водного потока [14]. В то же время в результате некоторых из экспериментов в колодцах центральной и южной части ледника выхода индикаторов в основных водотоках обнаружено не было, что свидетельствует о сложности и изменчивости дренажной системы, строение которой на большей части ледника до сих пор неизвестно.

В течение весеннего и летнего этапов полевого сезона экспедиции «Шпицберген-2020» были выполнены комплексные исследования, целью которых являлось определение положения поверхностных и внутренних дренажных каналов и гидрохимических характеристик водных потоков ледника Альдегонда.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Задача описания дренажной сети ледника Альдегонда решалась путем выполнения георадарных и гидрологических исследований.

Георадиолокационные работы, выполненные в 2020 г., продолжили исследования 2018–2019 гг., в результате которых было оценено изменение объема ледника и его теплого ядра за последние 19 лет [15]. При проведении георадиолокационной съемки использовался георадар Pulse ЕККО PRO (Sensors&Software, Канада). В работах применялась дипольная антенна с центральной частотой 50 МГц. Система регистрации геофизической информации располагалась в санях-волокушах и состояла из приемной и передающей антенн, блока записи информации и дифференциального спутникового приемника Sokkia GRX2 (Sokkia Topcon Co, Япония) для высокоточной плановой и высотной привязки получаемых данных. Для контроля точности определения плановых координат и упрощения последующей обработки данных использовался одометр, размещенный непосредственно за санями, при этом каждая трасса радарограммы дополнительно привязывалась при помощи дифференциального спутникового приемника, работавшего в режиме RTK (Real Time Kinematic). Буксировка всей системы осуществлялась с помощью снегохода. Скорость съемки составила 5–7 км/ч с интервалом сканирования 0,5 м. Теоретическая разрешающая способность использованной системы, т. е. возможность отделить два объекта, находящихся вблизи друг от друга, определяется исходя из длины волны локатора и глубины до исследуемого объекта [16, 17]. Так, разрешение по вертикали составляет 0,85 м вне зависимости от глубины; разрешение по горизонтали равно 5,8 м на глубине 20 м, 9,2 м на глубине 50 м и 13 м на глубине 100 м. Теоретический предел обнаружения объектов, т. е. их способность создавать отраженную волну с уровнем сигнала выше фонового шума, имеет значительно меньшие размеры и составляет 0,13 м [17].

Общий объем выполненных за 3 года георадиолокационных работ составил более 33 км, 12 км профилей были выполнены в 2020 г. непосредственно для изучения дренажной сети ледника и процессов, происходящих на его ложе, при этом все полевые работы производились в весенний период до начала таяния снежного

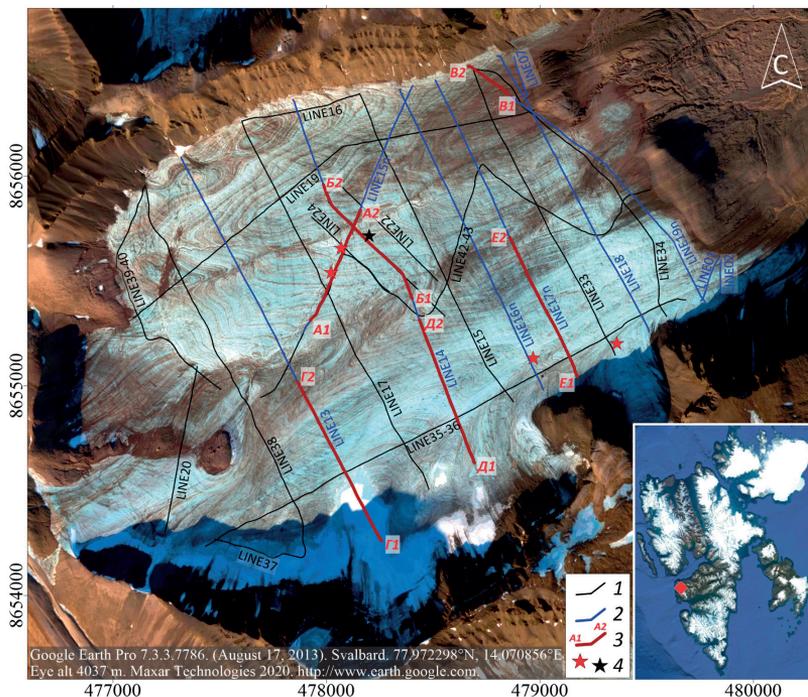


Рис. 1. Схема расположения георадиолокационных профилей на леднике Альдегонда: 1 — профили 2018–2019 гг.; 2 — профили 2020 г.; 3 — фрагменты профилей, показанные на рис. 5; 4 — активные (красный) и мертвый (черный) колодцы. Положение ледника на архипелаге Шпицберген показано на врезке (красный ромб)

Fig. 1. Scheme of GPR profiles on the Aldegondabreen: 1 — profiles of 2018–2019; 2 — profiles of 2020; 3 — fragments of the profiles shown in Fig. 5; 4 — active (red) and dead (black) wells. The glacier position in the Spitsbergen archipelago is shown in the inset (red diamond)

покрова. Общая схема георадиолокационных профилей в системе координат WGS84 (UTM зона 33N) представлена на рис. 1.

Обработка полученных радарограмм выполнялась в программе ЕККО\_Project V5 (Sensors&Software, Канада) по стандартной методике, включавшей ввод статических поправок, фильтрацию сигнала, регулировку амплитуд и учет рельефа. Процедура миграции данных не применялась, поскольку основными интересующими объектами являлись отражения гиперболической формы от локальных объектов. Для пересчета временных разрезов в глубинные было использовано значение скорости 168 м/мкс [8], принятое для всей толщи ледника.

В целях определения вклада подледниковых и подземных вод в питание реки Альдегонды и картирования выходов подледниковых каналов было проведено два маршрута 17 и 25 июля 2020 г. с задачей поиска подледниковых гротов, замеров минерализации (электропроводности) и температуры водотоков портативным кондуктометром Nach HQ 30d (Nach, США), а также отборов проб на гидрохимический анализ. Обнаруженные колодцы и выходы воды из-под ледника представлены на рис. 2. Анализ проб осуществлялся в лаборатории РНЦШ поселка Баренцбург на ионном хроматографе Shimadzu LC-20 Prominence (Shimadzu Corp., Япония) — определение

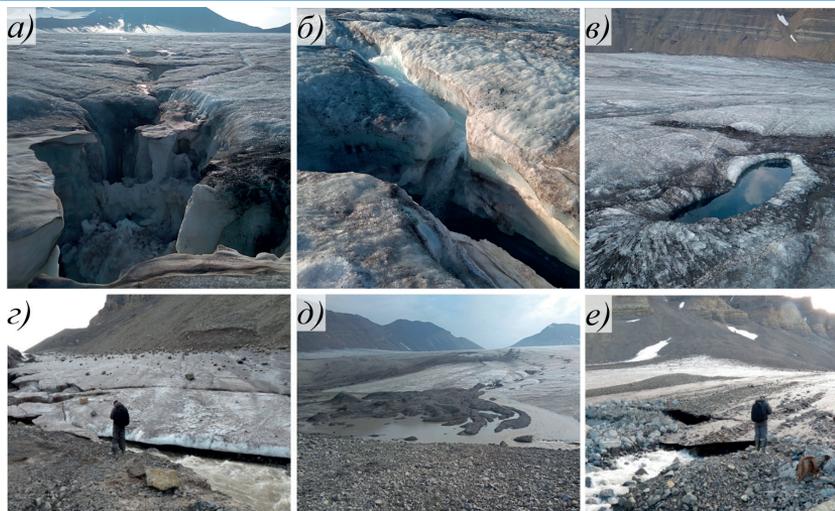


Рис. 2. Колодцы и выходы подледниковых потоков на языке ледника: *а)* — колодец в центральной части ледника; *б)* — колодец у южного борта ледника; *в)* — мертвый колодец в центральной части ледника (см. рис. 1); *г)* — выход воды у северного борта ледника; *д)* — водоем в средней части языка (возможный выход подледниковых вод); *е)* — выход воды у южного борта ледника

Fig. 2 Moulins and outlets of the subglacial flows at the glacier terminus: *a)* — a moulin in the central part of the glacier; *б)* — a moulin on the south side of the glacier; *в)* — a dead moulin in the central part of the glacier (see Fig. 1); *г)* — water outlet on the north side of the glacier; *д)* — reservoir in the middle part of the terminus (possible release of subglacial waters); *е)* — water outlet on the south side of the glacier

содержания основных ионов и анализаторе Shimadzu TOC-L (Shimadzu Corp., Япония) — определение содержания гидрокарбонат-иона. Ранее, в апреле 2020 г. была отобрана проба воды, изливающейся на поверхность наледи. Отдельные наблюдения за сильно минерализованными источниками велись с лета 2019 г. и продолжались до 19 сентября 2020 г. Положение пунктов отбора проб показано на рис. 3.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### *Гидрохимические особенности водотоков ледника Альдегонда*

Определение электропроводности и температуры водотоков осуществлялось в 54 пунктах на всех основных водотоках на поверхности ледника и в долине реки Альдегонды. Гидрохимическое апробирование проведено в 10 пунктах. Данные представлены в табл. 1.

По результатам работ выполнено картирование трех подледниковых гротов, зимней наледи, мест выхода сильно минерализованных источников, а также намечены предполагаемые пути движения воды внутри ледника (рис. 3).

Ледниковые потоки, берущие начало на поверхности ледника, повсеместно имеют низкие температуры (не выше 1 °С) и чрезвычайно низкую минерализацию, с электропроводностью около 20 мкСм/см. Химический состав воды гидрокарбонатно-кальциевый, повторяет состав атмосферных осадков.

Ледниковые потоки, берущие начало на осыпных и моренных склонах, обычно имеют электропроводность около 60 мкСм/см, в отдельных случаях достигая 100–

Таблица 1

Table 1

## Результаты гидрохимического опробования водотоков в долине реки Альдегонды

## Results of hydro-chemical testing for watercourses in the Aldegonda river valley

Проба	Дата отбора	Показатели, определенные <i>in situ</i>			Натрий (Na <sup>+</sup> ) мг/л	Калий (K <sup>+</sup> ) мг/л	Магний (Mg <sup>2+</sup> ) мг/л	Кальций (Ca <sup>2+</sup> ) мг/л	Хлориды (Cl <sup>-</sup> ) мг/л	Сульфаты (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) мг/л	Гидрокарбонаты (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) мг/л
		Т, °С	рН	УЭП, мксм/см							
1 (источник)	15.08.2019	5	7,64	760	3,72	0,202	19,74	174,6	3,27	263,4	64
2 (источник)	25.07.2020	4	7,7	760	3,35	0,160	18,47	158,0	2,47	256,0	61
3 (источник)	19.09.2020	4	7,8	700	3,19	0,227	17,88	143,1	2,34	242,1	72
4 (приток р. Альдегонды)	17.07.2020	3	8,06	112	1,02	<0,1	1,96	18,8	0,62	21,6	35
5 (ледниковый канал)	17.07.2020	0,6	8,69	100	0,88	<0,1	1,78	16,7	0,69	22,7	24
6 (подледниковый водоток)	17.07.2020	0,6	7,78	12	0,79	<0,1	0,40	2,9	0,10	0,5	9
7 (приток р. Альдегонды)	17.07.2020	0,7	8,97	27	<0,1	<0,1	0,51	8,5	0,09	0,7	22
8 (подледниковый водоток)	17.07.2020	0,7	8,67	41	0,20	<0,1	0,54	10,1	0,36	0,5	27
9 (приток р. Альдегонды)	17.07.2020	1,6	8,57	90	0,41	<0,1	1,31	17,2	0,31	14,7	33
10 (приток р. Альдегонды)	17.07.2020	9	8,06	308	11,87	7,714	10,74	41,8	7,86	41,6	114
11 (приустьевой отрезок р. Альдегонды)	17.07.2020	2,3	8,56	92	0,74	<0,1	1,38	16,6	0,52	11,8	36
12 (зимняя наледь в долине р. Альдегонды)	17.04.2020	0,3	7,8	1050	35,6	2,41	42,5	142	29,86	405	158,3

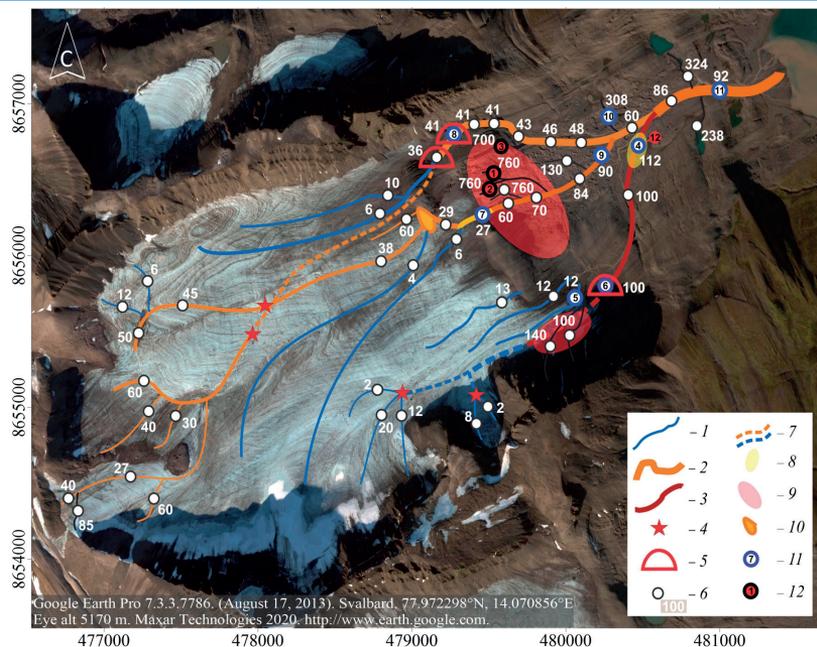


Рис. 3. Схема водотоков в долине р. Альдегонды: 1 — водотоки низкой минерализации (поверхностная дренажная сеть каналов ледника); 2 — водотоки средней минерализации; 3 — водотоки высокой минерализации; 4 — действующие ледниковые колодцы; 5 — гроты на выходе подледниковых потоков; 6 — точки замера минерализации с указанием электропроводности водотока (изм. в мкСм/см); 7 — предполагаемый путь подледниковых потоков; 8 — границы зимней наледи 2020; 9 — области скачка минерализации и выхода сильно минерализованных источников; 10 — озеро на леднике перед ригелем; 11 — точки отбора проб воды гидрокарбонатно-кальциевого состава; 12 — точки отбора проб воды сульфатно-кальциевого состава

Fig. 3. Scheme of watercourses in the Aldegonda river valley: 1 — watercourses of low mineralization (surface drainage network of glacier channels); 2 — streams of medium mineralization; 3 — streams of high mineralization; 4 — operating glacial moulins; 5 — grottoes at the outlet of subglacial streams; 6 — points of measurement of mineralization with indication of the electrical conductivity of the watercourse (measured in  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ); 7 — presumed path of subglacial flows; 8 — boundaries of winter frazil 2020; 9 — areas of mineralization jump and outflow of highly saline springs; 10 — lake on the glacier in front of the crossbar; 11 — sampling points of hydrocarbonate-calcium composition water; 12 — sampling points of sulphate-calcium composition water

140 мкСм/см. Их температура составляет около  $1^\circ\text{C}$ , состав гидрокарбонатно-кальциевый. Аналогичные характеристики имеют подледниковые водотоки, выходящие из ледниковых гротов вдоль южного и северного борта долины ледника Альдегонда. Исходя из сходства минерализации потоков, уходящих в систему колодцев в средней части ледника, и минерализации водотоков, исходящих из гротов на его языке, на рис. 3 отмечены их предполагаемые пути движения внутри ледника. Достаточно уверенно было выделено движение воды из северного колодца к гротам вдоль того же борта ледника. Труднее объяснить скачок минерализации, наблюдаемый между южными колодцами и гротом по южному борту ледника Альдегонда. Ниже этот вопрос рассмотрен с привлечением результатов георадарных исследований.

Электропроводность водотоков, берущих свое начало в озерах в нижней части морены ледника Альдегонда, достигает значений 324 мкСм/см. Они имеют высокую летнюю температуру в 10–12 °С и гидрокарбонатно-кальциевый состав. Насыщение реки сульфатно-кальциевыми водами, отличными по составу от основного объема талых ультрапресных гидрокарбонатно-кальциевых вод ледника, в летний период происходит в области значительного скачка минерализации, отмеченной в центральной части долины реки Альдегонды на коренных породах, слагающих крупный поперечный ригель. Здесь берут начало небольшие источники, которые характеризуются высокой минерализацией (электропроводность до 760 мкСм/см), температурой 4–5 °С, сульфатно-кальциевым составом (аналогично источникам озера Конгресс). Источники слабо газируют негорючим не имеющим запаха газом, активны в летний период, перемерзая осенью и зимой. Их расходы, по визуальным наблюдениям, следуют с некоторым запаздыванием по сравнению с прочими водотоками ледника Альдегонда и не имеют значительного вклада в общий годовом расходе реки Альдегонды.

Наличие достаточно обширной (площадь 0,8 км<sup>2</sup>) области теплого льда, расположенной на глубинах от 50 до 160 м [15], позволяет предполагать существование сквозного субгляциального талика в основании ледника, доступного для движения воды. Предположительно, выявленные по высокой электропроводности грунтовые воды источников на ригеле питаются за счет глубинной фильтрации талых ледниковых вод по подледниковому талику ледника Альдегонда. Существование такого талика связано с областью распространения теплого льда, изолирующего подстилающие горные породы от проникновения отрицательных температур [18, 19]. Однако не исключено и сквозное питание по субмеридиональным разломам и зонам трещиноватости, повторяющим простирание геологических структур западного берега залива Грэн-фьорд [20, 21], о чем может свидетельствовать схожесть химического состава источников и наледей рек Альдегонда и Брюде, а также приледниковой наледи ледника Западный Грэнфьорд. Их сульфатно-кальциевый состав следует объяснять фильтрацией подземных вод в карбонатных и гипсоносных породах пермского и каменноугольного периодов, простирающихся по линии север – юг вдоль западного берега залива Грэн-фьорд и подстилающих ложа ледников Альдегонда, Вёринг и Западный Грэнфьорд.

Наледь, имеющая незначительные размеры (150×50 м), в апреле 2020 г. наблюдалась в нижней части долины реки Альдегонды (1 км от устья) на удалении от ледника и скального ригеля (рис. 3). Проба воды, питающей наледь, была отобрана 17 апреля 2020 г. и показала сульфатно-кальциевый состав при электропроводности 1050 мкСм/см. Аналогичный состав и близкую минерализацию имели пробы, отобранные в апреле 2020 г. на наледях в каньоне р. Брюде (1 км от устья) и перед краем ледника Западный Грэнфьорд. Питание наледи, удаленной от края ледника на значительное расстояние и связанной по положению с зоной разломов, может, таким образом, происходить вне связи с субгляциальным таликом ледника Альдегонда.

Минерализация в устьевой части реки Альдегонды в среднем за сезон стока составляет 109 мг/л, воды реки характеризуются гидрокарбонатно-кальциевым составом [22]. По результатам замера расходов воды на основных водотоках вблизи языка ледника, сделанных в работе [12], было определено, что более 41 % в общий сток реки привносит выход воды из-под ледника, расположенный у его северного

борта. Центральный и южный водотоки примерно поровну делят оставшийся объем воды между собой. Несмотря на то, что новых инструментальных замеров расхода на водотоках не проводилось, сделанные выводы были подтверждены визуально, во время летних выходов на ледник. Как следует из проведенных в 2020 г. замеров, общая итоговая минерализация обусловлена различным вкладом трех основных водотоков, из которых крупнейший северный имеет более низкую минерализацию, чем центральный и южный, получающие скачок минерализации при прохождении скального ригеля у края ледника Альдегонда.

*Внутренняя дренажная сеть по данным георадиолокационного зондирования*

В результате выполненной георадиолокационной съемки на леднике было прослежено четыре основных канала (рис. 5, 6, 7). Выделенные дренажные каналы можно разделить на два типа: подледниковые, расположенные в зоне относительно маломощного холодного льда, берущие свое начало в серии колодцев, находящихся в центральной части ледника (каналы 1, 2), и внутриледниковые, начинающиеся в верховьях ледника и расположенные вблизи области теплого льда в южной части ледника (каналы 3, 4). Обработанная радарограмма по профилю LINE16n с выделением целевых объектов в толще ледника, а также фрагменты радарограмм с характерными примерами выделения каналов и питающих их колодцев представлены на рис. 4. Как видно из рисунка, каналы выделяются различными типами отражений. Так, канал 1 вблизи питающих его колодцев выделяется несколькими близкорасположенными гиперболами; в средней части ледника — как единичная интенсивная гипербола, а ближе к выходу из-под ледника как отражающая площадка. Канал 2 практически на всем протяжении имеет несколько близкорасположенных отражений гиперболической формы, расположенных на одной глубине. Каналы 3 и 4 выделяются одной или несколькими интенсивными гиперболами. В случае единичной гиперболы выделение канала производилось по вершине отражения, предположительно соответствующей кровле канала. При наличии нескольких близких отражений на одной глубине выделение проводилось по центру огибающей эти отражения линии. Отражений от донной части каналов на большинстве полученных разрезов не прослеживается. Для каналов 1 и 2 это, скорее всего, связано с их расположением непосредственно на ложе ледника, что подтверждается съемкой пещер на языке ледника [13]. Для каналов 3 и 4 вероятным объяснением этого является их небольшой размер, не позволяющий разделить отражения от кровли и подошвы каналов. Наиболее сложным с точки зрения интерпретации отражений являлось определение положения канала 3, где на нескольких профилях схожие по интенсивности отражения находятся на достаточно большом удалении друг от друга (см. рис. 4), в этом случае выделение канала проводилось по наиболее интенсивной гиперболе.

Наиболее достоверно определены каналы первого типа, которые располагаются в придонной части ледниковой толщи. Их питание осуществляется от серии колодцев, расположенных по линии, проходящей примерно с юга на север в центральной части ледника. Колодцы, питающие каналы, также отчетливо выделяются на георадиолокационных разрезах серией субвертикальных отражений высокой интенсивности (см. рис. 4 А1-А2). Дно основных колодцев предположительно выделяется на разрезах субгоризонтальными границами. Глубина колодцев по данным георадиолокации составляет 52–55 м (при общей толщине льда в этом районе 75–80 м), что хорошо согласуется с данными прямых измерений, выполненных в 2002–2003 гг. при

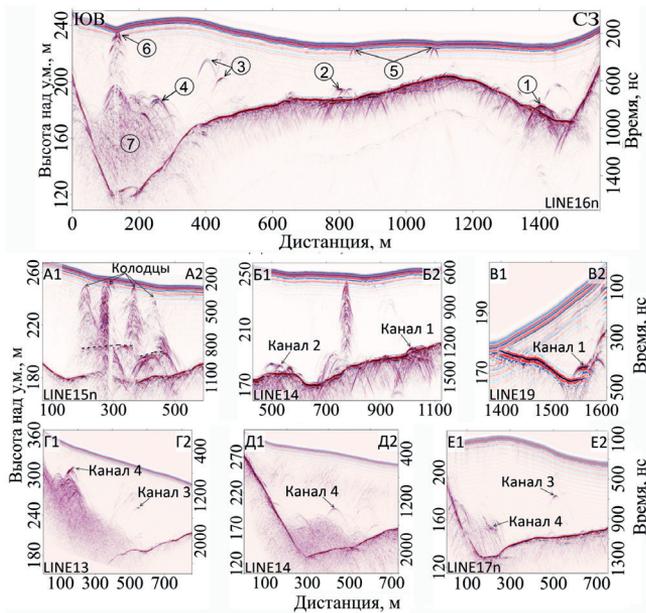


Рис. 4. Обработанный георадиолокационный разрез с введенным рельефом по профилю LINE16n и фрагменты разрезов с примерами выделения колодцев и дренажных каналов в разных частях ледника. Пунктирной линией на фрагменте A1-A2 показано предполагаемое положение дна колодцев.

1 — канал 1; 2 — канал 2; 3 — канал 3; 4 — канал 4; 5 — врезанные в лед поверхностные водотоки; 6 — колодец у южного борта ледника; 7 — область теплого льда

Fig. 4. Processed GPR section with embedded relief along the LINE16n profile and fragments of sections with examples of identifying moulin and drainage channels in different parts of the glacier. The dotted line on the fragment A1-A2 shows the estimated position of the bottom of the moulin.

1 — channel 1; 2 — channel 2; 3 — channel 3; 4 — channel 4; 5 — surface water courses cut into the ice; 6 — moulin on the south side of the glacier; 7 — area of temperate ice

спуске в колодцы [3, 11]. Это также свидетельствует об относительной стабильности их глубины, несмотря на ежегодное стаивание более чем 1,3 м льда [15]. Помимо действующих центральных колодцев, неподалеку был отмечен заполненный водой колодец (рис. 2в), у которого отсутствовала связь с поверхностной дренажной сетью (мертвый колодец). Он же выделен на георадиолокационном профиле LINE14 (рис. 4 B1-B2, интервал 750–760 м). Все это свидетельствует об изменчивости и сложной взаимосвязи системы питания подледниковых каналов.

Начинаясь непосредственно на дне колодцев, каналы быстро опускаются к ложу и в дальнейшем проходят исключительно вдоль ложа ледника. Достоверно прослежено 2 канала первого типа, берущих свое начало приблизительно в одном и том же месте. Положение колодцев, питающих каналы, выявлено во время летних выходов на ледник (рис. 2а). Определить по радарограммам точное положение колодцев, питающих каждый из каналов, довольно сложно из-за большого количества дифрагированных волн, образующихся непосредственно от выступов колодцев, и их вероятной сложной гидравлической связи между собой. О сложной взаимосвязи колодцев также могут свидетельствовать результаты индикаторных экспериментов

2005 и 2007 гг., когда запуск соли в близкорасположенные колодцы в первом случае дал однозначный ответ о положении выхода канала, а во втором показал отсутствие индикатора в том же водотоке [13]. Вертикальные профили каналов 1 и 2, показанные на рис. 5, дают представление о положении кровли каналов относительно ложа ледника в точках пересечения с профилями георадиолокации и между ними.

Канал 1 после опускания к ложу ледника постепенно поворачивает к его северному борту, по пути расширяясь и, возможно, вбирая более мелкие каналы. Ближе к языку ледника канал прослежен непосредственно вдоль его борта (рис. 4 В1-В2), возможно, частично уходя под отложения боковой морены, напозающей на лед в этой части ледника. Также на профиле LINE15 интенсивное отражение, ассоциируемое с каналом, отмечено ниже подошвы ледника на глубине до 2,5 м. Вероятно, в этом месте канал врезан в толщу пород, поскольку именно в этой части имеется локальное повышение поверхности ложа, которое канал и сглаживает (см. рис. 5). Форма канала, вероятно, имеет уплощенный вид, а его поперечные размеры постепенно увеличиваются от 3–5 м (по измерениям между крайними гиперболами) вблизи колодца до 30 м и более на языке ледника, что хорошо согласуется с результатами инструментальной съемки пещер на языке ледника [13]. Высокая интенсивность полученных от кровли каналов отражений свидетельствует о том, что его пространство хотя бы частично обводнено, несмотря на устойчивые отрицательные температуры воздуха на момент проведения георадиолокационных съемок. Канал заканчивается у северного борта ледника двумя выходами подледниковых вод (рис. 2с).

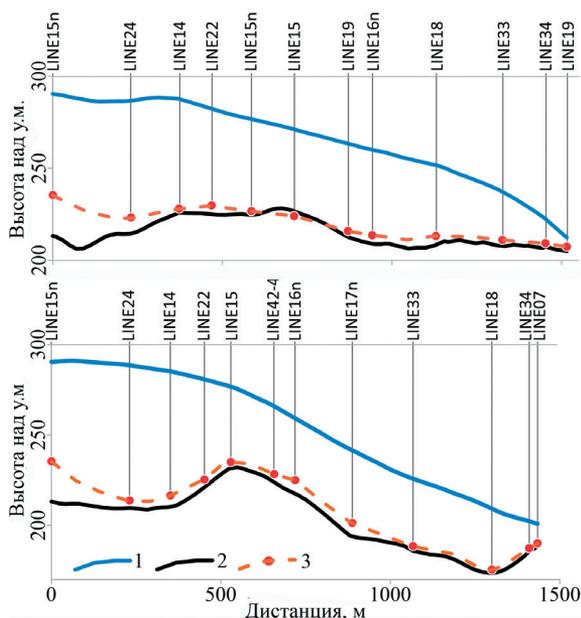


Рис. 5. Вертикальные профили подледниковых каналов 1, 2 и точки пересечения с профилями георадиолокации.

1 — поверхность ледника; 2 — ложе ледника; 3 — положение канала

Fig. 5. Vertical profiles of subglacial channels 1, 2 and points of intersection with GPR profiles.

1 — glacier surface; 2 — glacier bed; 3 — channel position

Канал 2 берет свое начало в той же серии колодцев, что и канал 1, но, отворачивая в начале пути к югу, на основном своем протяжении проходит под центральной частью ледника. В отличие от канала 1, интенсивность зарегистрированных локальных отражений ниже, при их большем количестве (рис. 4 Б1-Б2). Расстояние между крайними отражениями в средней части канала достигает 40 м, но, в отличие от канала 1, отдельные отражения не формируют единой структуры. Возможно, канал сильно меандрирует или состоит из нескольких расположенных поблизости рукавов. В нижней части ледника прослеживание канала становится затруднительным из-за его уменьшения вследствие возможного промерзания или разветвления. Выход подледниковых вод канала 2 наиболее вероятно находится в средней части ледника между двух ригелей, где расположен поверхностный водоток и небольшой водоем (рис. 2д). По данным гидрологических наблюдений прошлых лет [3, 14], в этом месте раньше располагался грот с выходом подледниковых вод, который, вероятно, обрушился из-за отступления ледника и близости крупного поверхностного водотока.

Следует отметить, что выполненные расчеты горизонтальных размеров подледниковых каналов следует оценивать с осторожностью, поскольку пересечение канала георадиолокационным профилем может происходить не под прямым углом, в том числе из-за меандрирования канала. Задача оценки высоты каналов также является сложной, поскольку большое значение для расчета имеет состав заполнителя полости (воздух, вода и их пропорции). В зависимости от их соотношения будет изменяться скорость распространения электромагнитной волны и, соответственно, расчетная высота канала. Так, если пересчитать измеренные интервалы времени между кровлей каналов и ложем ледника в глубины, то при заполнении каналов воздухом их высота составит 5–9 м, а при заполнении водой — 0,5–0,9 м. С учетом высокой интенсивности большинства выделенных отражений, связанной с хотя бы частичным обводнением каналов, их реальная высота находится где-то между этими значениями.

Как видно из табл. 1, выходы каналов 1 и 2 имеют гидрокарбонатно-кальциевый химический состав, повторяющий состав атмосферных осадков, и низкую электропроводность в 30–40 мкСм/см. Сходство минерализации потоков, уходящих в систему колодцев в средней части ледника, и минерализации водотоков, исходящих из гротов на его языке (рис. 3), подтверждает предположение о питании каналов 1, 2 и месте их выхода из-под ледника, а также свидетельствует об отсутствии заметного роста минерализации подледниковых потоков во время движения вдоль ложа ледника по каналам данного типа.

Каналы второго типа расположены в южной, глубокой части ледника и выделены на большинстве георадиолокационных разрезов вблизи зоны теплого льда (см. рис. 6, 7). Как правило, каналы выделяются как одна или несколько дифрагированных волн, представляющих собой отражения гиперболической формы относительно высокой интенсивности, расположенные на некотором удалении друг от друга (рис. 4 Г1-Г2, Д1-Д2, Е1-Е2). Каналы расположены в толще льда, имеют небольшие размеры, определить которые чаще всего не представляется возможным. Вертикальные профили каналов 3 и 4 представлены на рис. 6.

Каналы берут свое начало в верховьях южного борта ледника, в районе снежников, расположенных на высотах более 450 м, которые, благодаря высоте и северной экспозиции склона, сохраняются большую часть лета (см. рис. 1). Точного положения

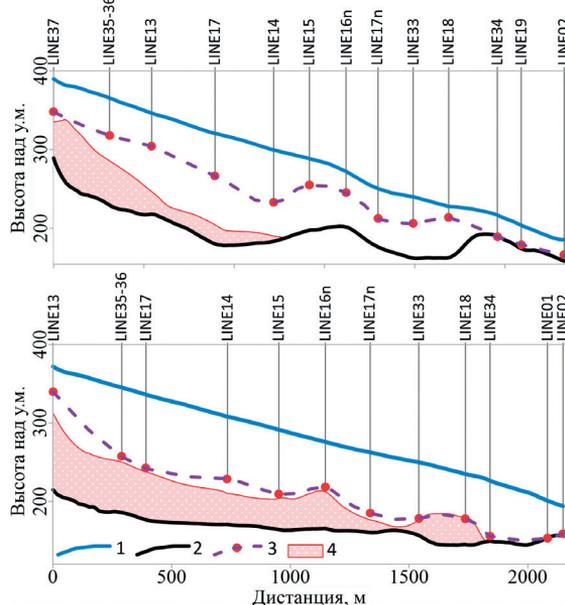


Рис. 6. Вертикальные профили внутриледниковых каналов 3, 4 и точки пересечения с георадиолокационными профилями.

1 — поверхность ледника; 2 — ложе ледника; 3 — положение канала, 4 — область теплого льда

Fig. 6. Vertical profiles of englacial channels 3, 4 and points of intersection with GPR profiles.

1 — glacier surface; 2 — glacier bed; 3 — channel position, 4 — temperate ice

питающих каналы колодцев обнаружено не было из-за труднодоступности данной части ледника. Вероятно, крупные колодцы в этой части ледника отсутствуют, а питание каналов происходит по развитой системе трещин растяжения, по которым талая вода поступает в толщу ледника.

Канал 3 представляет собой зону с серией одиночных дифрагированных волн, некоторые из которых (как правило, одна-две) имеют более высокую интенсивность отражения. Гиперболические отражения обнаружены на глубинах от 20 до 60 м, но при этом сосредоточены на небольшом горизонтальном интервале (см. рис. 4). На некоторых разрезах интенсивность отражений сильно уменьшается (например, рис. 4 Д1-Д2), что, вероятно, свидетельствует о промерзании канала на момент измерений. Начинаясь в верховьях ледника, в непосредственной близости от области теплого льда, канал постепенно от нее отходит и, не опускаясь к ложу ледника, прослеживается на всех поперечных профилях до поднятия рельефа ложа перед языком ледника. В нижней части ледника, непосредственно перед резким поднятием ложа, однозначное прослеживание канала становится затруднительным из-за большого количества схожих отражений от локальных обводненных участков льда. Вероятно, канал опускается к ложу ледника и, упираясь в ригель, поворачивает к южному борту, где отмечен выход подледниковых вод (рис. 2e).

Канал 4 берет начало в той же зоне снежников, что и канал 3, но спускается к кровле теплого льда и отмечается как интенсивная одиночная гипербола (или несколько гипербол рядом) вблизи кровли теплого льда. Этот факт дополнительно

осложнял его прослеживание, поскольку толща теплого льда выделяется на разрезах идентичными отражениями. При этом интенсивность выделяемых отражений в целом выше, чем у канала 3. Вероятно, именно этот канал был прослежен при георадиолокационной съемке 1999 г. [10]. Располагаясь в верхней части ледника выше области теплого льда приблизительно на 20 м, канал постепенно опускается к его кровле в районе пересечения с профилем LINE16n. Ближе к языку ледника канал опускается к ложу вместе с истончением слоя теплого льда и, вероятно, выходит на поверхность там же, где и канал 3, а его однозначное прослеживание в этой части также затруднительно из-за большого числа похожих отражений в районе ложа.

Также у южного борта ледника, в его средней части отмечены два активных колодца. Определение глубины и направления каналов, начинающихся из этих колодцев, по данным георадиолокации является проблематичным, поскольку они находятся непосредственно над областью теплого льда, который, выделяясь интенсивными отражениями, не позволяет разделить схожие объекты. Пример выделения одного из колодцев (более южного) на профиле LINE16n представлен на рис. 4.

Индикаторные эксперименты И.Ю. Соловьяновой [13], проводившиеся в 2006 г. в этих колодцах, не выявили предполагаемых выходов воды на языке ледника за 4 часа проведенных наблюдений, несмотря на расстояние между колодцами и ближайшим выходом подледниковых вод не более 1,5 км. Исходя из новых имеющихся данных, можно предположить две вероятные причины этого факта. Во-первых, вблизи от этих колодцев, по данным георадиолокации, имеются переуглубления ложа ледника глубиной до 14 м, в которых вода может скапливаться некоторое время (рис. 7, черные контуры). Во-вторых, колодцы расположены в области теплого льда, который является более пористым по сравнению с холодным и также способен накапливать воду. Возможно, попадая в колодец, вода медленно дренируется к ложу ледника по системе пор и небольших каналов в обозначенные переуглубления, выходя на поверхность у южного борта ледника с большой задержкой.

Общий предположительный выход внутрiledниковых каналов 3 и 4, так же как и каналов 1 и 2, имеет гидрокарбонатно-кальциевый состав, однако его минерализация выше, и значение электропроводности составляет 100 мкСм/см. Поскольку талые ледниковые воды, попадающие в каналы 3 и 4, далее текут в толще ледника, не выходя к ложу и не контактируя с горной породой, скачок минерализации становится возможен только в непосредственной близости от языка ледника, где каналы опускаются к ложу, и в области скального порога непосредственно перед выходом из грота у южного борта ледника. Фиксируемые здесь повышенные значения в 100 мкСм/см предположительно достигаются благодаря частичной или полной фильтрации подледникового потока в местах переуглубления ложа и в районе ригеля, в который предположительно упирается канал 3. После этого поток собирается в одно русло и выходит на дневную поверхность из грота. Высокая степень минерализации отмечена в этой области также в поверхностных ледниковых потоках, берущих начало на осыпных и моренных склонах, которые у южного борта ледника имеют электропроводность 100–140 мкСм/см и температуру около 1 °С. Не исключен также вклад сильно минерализованных сульфатно-кальциевых подземных вод на ригеле под южным языком ледника.

На заключительном этапе положение выделенных по данным георадиолокации дренажных каналов было сопоставлено с сетью каналов, полученной путем

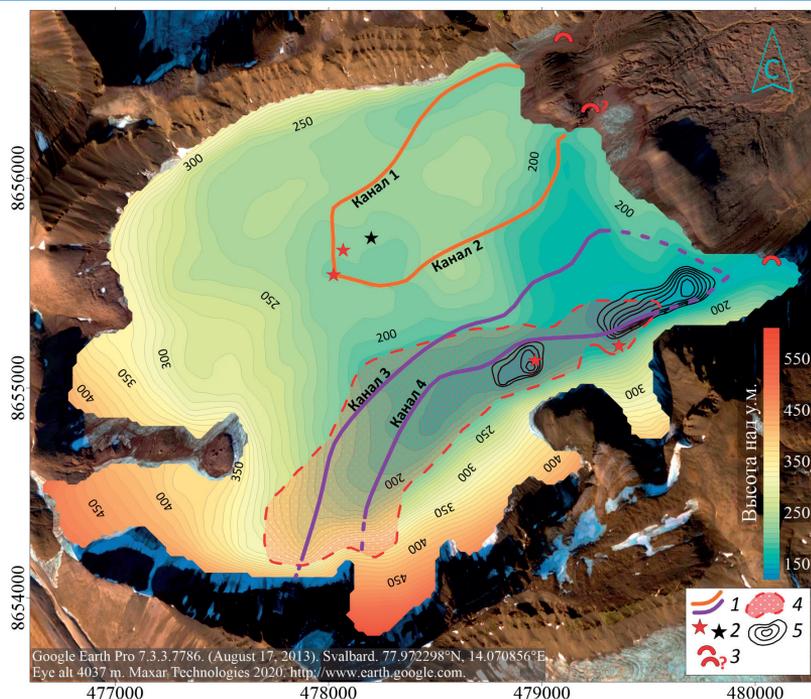


Рис. 7. Рельеф ложа ледника Альдегонда с нанесенным положением выделенных дренажных каналов.

1 — положение выделенных каналов; 2 — активные (красный) и мертвый (черный) колодцы; 3 — известные и предполагаемые гроты на выходе подледниковых потоков; 4 — область распространения теплого льда; 5 — участки переуглублений на ложе ледника (изолинии даны через 2,5 м)

Fig. 7. Aldegondabreen bedrock topography with the plotted position of the identified drainage channels.

1 — position of selected channels; 2 — active (red) and dead (black) moulins; 3 — known and expected grottoes at the outlet of subglacial streams; 4 — area of distribution of tempered ice; 5 — areas of overdeepening on the glacier bed (the contours are shown at 2.5 m intervals)

расчета гидравлического потенциала ледника [23]. Для выполнения расчета необходимо знание высот поверхности и ложа ледника, плотности льда и воды, а также ускорение свободного падения на данной широте. Переменным коэффициентом в расчете является значение давления воды на ложе, выраженное в долях давления вышележащего льда и принимающее значение от 0 до 1. Формула расчета и подробное описание процедуры даны в работах [23–25]. К недостаткам подобного моделирования можно отнести отсутствие учета различной плотности льда, а также его трещиноватости, что в реальности приводит к неравномерному распределению давления воды в толще ледника [3].

Реконструкция была выполнена для двух состояний дренажной сети. В первом случае давление на ложе равнялось давлению всего вышележащего льда (коэффициент равен 1), что соответствует полностью заполненным водой каналам, направление которых перпендикулярно эквипотенциальным поверхностям. Во втором случае значение давления вышележащего льда было уменьшено в два раза (коэффициент

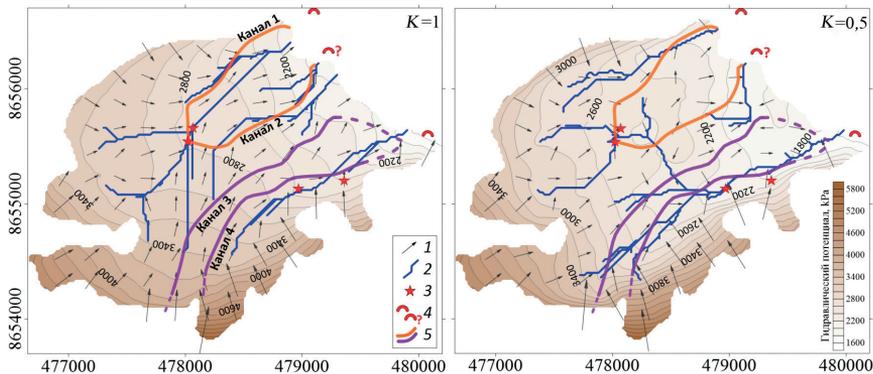


Рис. 8. Распределение гидравлического потенциала и пути движения воды на ложе для различных условий давления вышележащего льда.

1 — направление и относительная величина гидравлического потенциала в узлах модели; 2 — пути движения воды на ложе; 3 — активные колодцы; 4 — известные и предполагаемые гроты на выходе подледниковых потоков; 5 — положение каналов, выделенных по данным георадиолокации

Fig. 8. Distribution of the hydraulic potential for various pressure conditions of the overlying ice and the path of water flows on the bed.

1 — direction and relative value of the hydraulic potential in the nodes of the model; 2 — paths of water flows on the bed; 3 — active moulins; 4 — known and expected grottoes at the outlet of subglacial streams; 5 — channel positions according to GPR

0,5), что, следуя работе [24], может быть интерпретировано как дренажная сеть, которая в сезон абляции существует при давлении ниже давления вышележащего льда из-за высокого поверхностного таяния и значительного увеличения элементов дренажной сети. Оба сценария теоретически возможны на исследуемом леднике. Для построения путей движения воды на карте распределения гидравлического потенциала был использован алгоритм watershed программы Surfer (Golden Software LLC, США), который позволяет рассчитывать линии тока воды на основе количества потока в узел сетки из всех окружающих узлов. Это показывает путь, по которому вода будет проходить через сеть, а линии тока отмечают низкие точки на карте. Результат реконструкции и его сопоставление с каналами, выделенными по данным георадиолокации, представлены на рис. 8. Как видно из рисунка, лучшее совпадение наблюдается при коэффициенте давления воды, равном 1, а наиболее достоверно определяются подледниковые каналы 1 и 2, расположенные в северной части ледника. Положение действующих колодцев и выходов воды из подледниковых каналов также хорошо коррелирует с реконструированными линиями тока.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показывают, что в современных условиях ледник Альдегонда имеет четыре основных дренажных канала, которые можно разделить на два типа исходя из их положения относительно ложа ледника и условий питания. Два канала первого типа расположены в северной, неглубокой части ледника. Они берут свое начало в центральной части ледника и, попадая в сложную систему ледниковых колодцев, до своего выхода из гротов проходят вдоль ложа ледника под толщей холодного льда. При этом основным каналом, дренирующим большую часть воды, является канал 1, имеющий, по данным георадиолокации, наибольшие раз-

меры и интенсивность отражения, что хорошо согласуется с данными [12]. После опускания каналов к ложу ледника их связь с поверхностью не прослеживается, что говорит в пользу их происхождения и развития по локальным трещинам [3], а не в процессе захоронивания поверхностного водотока, как это определено на леднике Лонгйир в работе [5].

На выходе подледниковые воды имеют гидрокарбонатно-кальциевый состав и низкую минерализацию (электропроводность 30–40 мкСм/см), унаследованную от поверхностных водотоков, попадающих в колодцы в средней части ледника. Роста минерализации в ходе движения потока вдоль ложа ледника не происходит.

Каналы второго типа имеют небольшой размер и расположены в южной, глубокой части ледника, ближе к его южному борту. Они берут свое начало в районе снежников и трещин растяжения в верховьях ледника и далее протягиваются внутри толщи ледника в районе его максимальной мощности, вблизи области теплого льда. Наличие снежников, расположенных на высотах более 450 м, где по некоторым данным [26] до недавнего времени происходило незначительное питание ледника, а также максимальные поверхностные скорости движения льда (более 1,9 м/год), полученные по данным геодезической съемки [27], позволяют предположить, что в этой части ледника также происходило питание области теплого льда. Это подтверждается минимальными глубинами до кровли теплого льда, полученными в этой же части ледника, по результатам георадарных исследований 2018–2019 гг. [15].

Подледниковые воды на выходе из грота у южного борта имеют гидрокарбонатно-кальциевый состав и повышенную минерализацию (электропроводность 100 мкСм/см), которая превосходит минерализацию подледниковых водотоков 1 и 2, а также значительно превосходит минерализацию поверхностных водотоков ледника. Используя информацию о геометрии каналов, их минерализации и результатах индикаторных экспериментов, а также зная особенности строения ложа, можно предположить, что повышенная минерализация потоков на выходе из грота у южного борта ледника связана с частичным или полным медленным дренированием воды через горные породы в переуглублениях ложа ледника и у скального ригеля, непосредственно перед выходом водотока на поверхность. Выполненный расчет гидравлического потенциала и реконструкция подледниковой дренажной сети в основном соответствуют выявленному положению подледниковых каналов и активных колодцев, подтверждая тяготение основных водотоков к северной части ледника. При этом лучшее совпадение реконструированной дренажной сети с каналами, выделенными по данным георадиолокации, наблюдается при полном давлении вышележащего льда.

Можно добавить, что выделенная дренажная сеть из четырех каналов не является полной. На некоторых разрезах имеются отдельные интенсивные гиперболы, которые прослежены на одном или нескольких профилях, но не образуют единой системы. Возможно, это отмершие каналы или небольшие притоки, соединяющиеся с основными четырьмя каналами. Также возникает сложность при картировании каналов в нижней части ледника, где наблюдается промерзание каналов из-за малой мощности льда, а также присутствуют схожие отражения от локальных обводненных участков.

Путем замеров минерализации и исследования химического состава водотоков в области ригеля ниже фронта ледника удалось определить зону выходов сильно минерализованных (700–760 мкСм/см) газифицирующих источников подземных вод суль-

фатно-кальциевого состава, весьма схожих по своим характеристикам с источниками о. Конгресс. Скачок минерализации в этой зоне весьма заметен, хотя вклад источников в общий расход реки Альдегонды остается небольшим и не приводит к изменению ее химического состава, обусловленного поступлением большого объема талых ледниковых вод. В совокупности с водотоками, текущими из озер в нижней части морены ледника, в устьевой области реки наблюдается гидрокарбонатно-кальциевый состав вод со средней минерализацией 109 мг/л.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование.** Исследования выполнены в рамках работ по программе Российской научной арктической экспедиции на архипелаге Шпицберген (РАЭ-Ш) ФГБУ «ААНИИ» и тематики НИОКР Росгидромета, а также при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 18-05-00421 «Особенности формирования и развития паводков подледниковых водоемов Антарктиды».

**Competing interests.** The authors declare the absence of competing interests.

**Funding.** The studies were carried out as part of the program of the Russian scientific Arctic expedition on the Spitsbergen (RAE-S) of FSBI “AARI”, the R&D topics of Roshydromet and with the financial support by RFBR grant No 18-05-00421 “Main features of formation and development of the Antarctic subglacial floods”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глазовский А.Ф., Мачерет Ю.Я. Вода в ледниках. Методы и результаты геофизических и дистанционных исследований. М.: ГЕОС, 2014. 528 с.
2. Irvine-Fynn T.D.L., Hodson A.J., Moorman B.J., Vatne G., Hubbard A.L. Polythermal Glacier Hydrology: A review // Review of Geophysics. 2011. V. 49. <https://doi.org/10.1029/2010RG000350>.
3. Мавлюдов Б.Р. Внутренние дренажные системы ледников. М.: Институт географии РАН, 2006. 396 с.
4. 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.
5. Hansen L.U., Piotrowski J.A., Benn D.I., Sevestre H. A cross-validated three-dimensional model of an englacial and subglacial drainage system in a High-Arctic glacier // Journal of Glaciology. 2020. № 66 (256). P. 278–290. doi: 10.1017/jog.2020.1.
6. Vælum K., Benn D.I. Thermal structure and drainage system of a small valley glacier (Tellbreen, Svalbard), investigated by ground penetrating radar // The Cryosphere. 2011. V. 5. P. 139–149. doi: 10.5194/tc-5-139-2011.
7. Stuart G., Murray T., Gamble N., Hayes K., Hodson A. Characterization of englacial channels by ground-penetrating radar: An example from Austre Brøggerbreen, Svalbard // J. of Geophys. Research. 2003. V. 108. Iss. B11. 2525. doi: 10.1029/2003JB002435.
8. Мачерет Ю.Я. Радиозондирование ледников. М.: Научный Мир, 2006. 389 с.
9. Мачерет Ю.Я., Журавлев А.Б. Радиолокационное зонирование ледников Шпицбергена с вертолета // МГИ. 1980. Вып. 37. С. 109–121.
10. Василенко Е.В., А.Ф. Глазовский, Мачерет Ю.Я., Наварро Ф.Х., Токарев М.Ю., Калашиников А.Ю., Мирошниченко Д.Е., Резников Д.С. Радиофизические исследования ледника Альдегонда на Шпицбергене в 1999 г. // МГИ. 2001. Вып. 90. С. 86–99.

11. Мавлюдов Б.Р. О внутреннем дренаже политермальных ледников, Шпицберген // Комплексные исследования природы Шпицбергена: Сб. материалов V междунар. конф. Вып. 5. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2005. С. 314–331.
12. Соловьянова И.Ю., Третьяков М.В., Прямыков С.М. Особенности формирования стока реки Альдегонда (Шпицберген) // Комплексные исследования природы Шпицбергена: Сб. материалов V междунар. конф. Вып. 5. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2005. С. 348–355.
13. 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.
14. Изучение метеорологического режима и климатических изменений в районе архипелага Шпицберген // НТО об экспедиции «Шпицберген-2005», нач. эксп. И.Ю. Соловьянова. СПб., 2005. 157 с. Фонды ААНИИ, инв. № Р-5547.
15. 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. Т. 61. № 1. С. 26–37. doi: 10.31857/S2076673421010069.
16. Владов М.Л., Судакова М.С. Георадиолокация: от физических основ до перспективных направлений. М.: ГЕОС, 2017. 240 с.
17. Sheriff R.E. Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics. Fourth edition. Society of Exploration Geophysicists, 2002. 442 p. doi: 10.1190/1.9781560802969.
18. Gokhman V.V. Distribution and conditions of formation of glacial icings on Spitsbergen // Polar Geography and Geology. 1987. V. 11:4. P. 249–260. doi: 10.1080/10889378709377334.
19. Mallinson L., Swift D.A., Sole A. Proglacial icings as indicators of glacier thermal regime: ice thickness changes and icing occurrence in Svalbard // Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography. 2019. V. 101:4. P. 334–349. doi: 10.1080/04353676.2019.1670952.
20. Geological Map Svalbard 1:100 000. Isfjorden (G100) // B9G. Norsk Polarinstitut Temakart nr. 16, 1992.
21. Geological Map Svalbard 1:100 000. Van Mijenfjorden (G100) // B10G. Norsk Polarinstitut Temakart nr. 2, 1986.
22. Ромашова К.В., Румянцева Е.В., Третьяков М.В. Минерализация и ионный сток рек водосбора залива Гренфьорд (архипелаг Шпицберген) // Труды VIII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2019)» Т. I (III): [Сборник]. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2020. С. 268–271.
23. Shreve R. Movement of Water in Glaciers // Journ. of Glaciology. 1972. V. 11. № 62. P. 205–214. doi: 10.3189/S002214300002219X.
24. Ripplin D., Willis I., Arnold N., Hodson A., Moore J., Kohler J., Björnsson H. Changes in geometry and subglacial drainage of Midre Lovénbreen, Svalbard, determined from digital elevation models // Earth Surf. Process. Landforms. 2003. V. 28. P. 273–298. doi: 10.1002/esp.485.
25. Лаврентьев И.И., Мачерет Ю.Я., Холмунд П., Глазовский А.Ф. Гидротермическая структура и подледниковая дренажная гидрологическая сеть ледника Тавле на Шпицбергене // Лед и снег. 2011. № 3 (115). С. 41–46.
26. Мавлюдов, Б.Р., Кудиков А.В. Изменение ледника Альдегонда с начала XX века // Вестник Кольского научного центра РАН. 2018. № 3 (10). С. 152–162.
27. Гляцио-геофизические исследования // НТО об экспедиции «Шпицберген-2019», нач. эксп. А.Л. Новиков. СПб., 2019. 152 с. Фонды ААНИИ, инв. № О-4101.

## REFERENCES

1. Glazovsky A.F., Macheret Yu.Ya. *Voda v lednikakh. Metody i rezul'taty geofizicheskikh i distantsionnykh issledovaniy*. Water in glaciers. Methods and results of geophysical and remote sensing studies. Moscow: GEOS, 2014: 528 p. [In Russian].
2. Irvine-Fynn T.D.L., Hodson A.J., Moorman B.J., Vatne G., Hubbard A.L. Polythermal Glacier Hydrology: A review. *Review of Geophysics*. 2011, 49. <https://doi.org/10.1029/2010RG000350>.
3. Mavliudov B.R. *Vnutrennie drenazhnye sistemy lednikov*. Internal drainage systems of glaciers. Moscow: Institut geografii RAN, 2006: 396 p. [In Russian].
4. 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].
5. Hansen L.U., Piotrowski J.A., Benn D.I., Sevestre H. A cross-validated three-dimensional model of an englacial and subglacial drainage system in a High-Arctic glacier. *Journal of Glaciology*. 2020, 66 (256): 278–290. doi: 10.1017/jog.2020.1.
6. Bælum K., Benn D.I. Thermal structure and drainage system of a small valley glacier (Tellbreen, Svalbard), investigated by ground penetrating radar. *The Cryosphere*. 2011, 5: 139–149. doi: 10.5194/tc-5-139-2011.
7. Stuart G., Murray T., Gamble N., Hayes K., Hodson A. Characterization of englacial channels by ground-penetrating radar: An example from Austre Brøggerbreen, Svalbard. *J. of Geophys. Research*. 2003, 108, B11: 2525. doi: 10.1029/2003JB002435.
8. Macheret Yu.Ya. *Radiozondirovanie lednikov*. Radio-echo sounding of glaciers. Moscow: Nauchnyi Mir, 2006: 389 p. [In Russian].
9. Macheret Yu.Ya., Zhuravlev A.B. Radar sounding of the Spitsbergen glaciers from a helicopter. *Materialy Glatiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1980, 37: 109–121. [In Russian].
10. 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 Glyatiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2001, 90: 86–99. [In Russian].
11. Mavliudov B.R. About internal drainage of polythermal glaciers, Svalbard. *Kompleksnye issledovaniia prirody Shpitsbergena: Sb. materialov V mezhdunar. konf.* Comprehensive studies of the nature of Spitsbergen: collection of materials of the 5th Int. Conf. Apatity, 2005: 314–331. [In Russian].
12. Solov'ianova I.Iu., Tret'iakov M.V., Priamikov S.M. Features of the flow formation of the Aldegonda River (Spitsbergen). *Kompleksnye issledovaniia prirody Shpitsbergena: Sb. materialov V mezhdunar. konf.* Comprehensive studies of the nature of Spitsbergen: collection of materials of the 5th Int. Conf. Apatity, 2005: 348–355. [In Russian].
13. *Izuchenie meteorologicheskogo rezhima i klimaticheskikh izmenenii v raione arhipelaga 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].
14. *Izuchenie meteorologicheskogo rezhima i klimaticheskikh izmenenii v raione arhipelaga Shpitsbergen: NTO ob ekspeditsii «Shpitsbergen-2006»*. Study of the meteorological regime and climatic changes in the Spitsbergen archipelago: scientific report. expedition leader I.Iu. Solov'ianova. St. Petersburg, 2006: 210 p. Arctic and Antarctic Research Institute Repository ID № P-5607. [In Russian].
15. 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].

16. *Vladov M.L., Sudakova M.S. Georadiolokatsiia: ot fizicheskikh osnov do perspektivnykh napravlenii.* Georadar: from physical fundamentals to promising directions. Moscow: GEOS, 2017: 240 p. [In Russian].
17. *Sheriff R.E.* Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics. Fourth edition. Society of Exploration Geophysicists, 2002: 442 p. doi: 10.1190/1.9781560802969.
18. *Gokhman V.V.* Distribution and conditions of formation of glacial icings on Spitsbergen. *Polar Geography and Geology.* 1987, 11:4: 249–260. doi: 10.1080/10889378709377334.
19. *Mallinson L., Swift D.A., Sole A.* Proglacial icings as indicators of glacier thermal regime: ice thickness changes and icing occurrence in Svalbard. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography.* 2019, 101:4: 334–349. doi: 10.1080/04353676.2019.1670952.
20. Geological Map Svalbard 1:100 000. Isfjorden (G100). B9G. Norsk Polarinstitut Temakart nr. 16, 1992.
21. Geological Map Svalbard 1:100 000. Van Mijenfjorden (G100). B10G. Norsk Polarinstitut Temakart nr. 2, 1986.
22. *Romashova K.V., Rumiantseva E.V., Tret'iaikov M.V.* Mineralization and ionic flow of rivers in the Grenfjord bay catchment area (Spitsbergen archipelago). *Trudy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Morskoe issledovaniia i obrazovanie (MARESEDU-2019)».* Proceedings of the VIII international scientific and practical conference “Marine research and education (MARESEDU-2019)”. Tver: PolyPress, 2020: 268–271. [In Russian].
23. *Shreve R.* Movement of water in glaciers. *Journ. of Glaciology.* 1972, 11 (62): 205–214. doi: 10.3189/S002214300002219X.
24. *Rippin D., Willis I., Arnold N., Hodson A., Moore J., Kohler J., Björnsson H.* Changes in geometry and subglacial drainage of Midre Lovénbreen, Svalbard, determined from digital elevation models. *Earth Surf. Process. Landforms.* 2003, 28: 273–298. doi: 10.1002/esp.485.
25. *Lavrentiev I. I., Macheret Yu.Ya., Holmund P., Glazovsky A.F.* Hydrothermal structure and subglacial drainage network of Tavlebreen in Spitsbergen. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2011, 3 (115): 41–46. [In Russian].
26. *Mavliudov, B.R., Kudikov A.V.* Aldegonda glacier change since the early 20th century. *Vestnik Kolskogo nauchnogo tsentra RAN.* Bulletin of the Kola Science Center RAS. 2018, 3 (10): 152–162. [In Russian].
27. *Gliatsio-geofizicheskie issledovaniia: NTO ob ekspeditsii «Shpitsbergen-2019».* Glacio-geophysical research: scientific report. expedition «Shpitsbergen-2019». Exp. leader A.L. Novikov. Saint-Petersburg, 2019: 152 p. Arctic and Antarctic Research Institute Repository ID № O-4101. [In Russian].