

Каменные глетчеры горных сооружений северо-востока Якутии

В. М. Лыткин

*Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН
Якутск, 677010, Россия
E-mail: gidro1967@mail.ru*

Каменные глетчеры — распространённые формы рельефа перигляциального пояса многих горных сооружений мира. Они являются важными компонентами водного стока в некоторых аридных и полуаридных районах, и поэтому их учёт важен при оценке водных запасов. Горные сооружения северо-востока Якутии имеют оптимальные условия для формирования каменных глетчеров, но они до настоящего времени остаются малоизученными в этом отношении. На основе геоинформационного картографирования по данным дистанционного зондирования Земли в пределах хребтов Черского, Верхоянского, Момского и Сунтар-Хаята обнаружено 4503 каменных глетчера с общей площадью 224,6 км². Они расположены в пределах абсолютных высот от 503 до 2496 м. Большая часть этих образований находится в бортах троговых долин и образуют протяжённые присклоновые типы каменных глетчеров. Распределение каменных глетчеров по горным хребтам неоднородно: 55 % от дешифрованных образований располагается в хр. Черского, в Верхоянском хр. — 12,2 %, в хр. Сунтар-Хаята — 11,7 % и в Момском хр. — 5,5 %.

Ключевые слова: каменные глетчеры, дистанционное зондирование, инвентаризация, многолетнемерзлые грунты

Одобрена к печати: 17.06.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-91-97

Введение

Под каменными глетчерами понимаются стратифицированные (слоистые), сцементированные льдом грубообломочные образования, имеющие вид языков, лопастей и террасовидных шлейфов со слабонаклонной поверхностью и крутым фронтальным уступом, способные к монолитному пластическому течению (Галанин, 2010). Они встречаются во многих горных районах Европы, Северной и Южной Америки, Азии (Barsch, 1996). Традиционно принято выделять две различные генетические группы (два типа) каменных глетчеров: 1) криогенный тип — глетчеры, которые формируются за счёт промерзания грубообломочных склоновых отложений; 2) ледниковый тип — связан с абляцией каровых ледников и льдистых морен, которые в результате эпигенетического промерзания превращаются в каменные глетчеры (Галанин, 2010).

Каменные глетчеры являются наиболее крупными формами криогенного рельефа и могут достигать в длину нескольких километров, в ширину — сотен метров, в толщину — десятков метров. Тело каменного глетчера ограничено боковыми и фронтальным уступами, причём крутизна последнего может достигать до 35°. Поверхность обычно гофрирована за счёт дугообразных поперечных валов и ложбин, выпуклость которых обращена в сторону движения каменного глетчера. Они образуются за счёт различий в скоростях движения осевой и боковых частей каменного глетчера. Скорость движения каменных глетчеров может варьироваться в широких пределах: от первых сантиметров до нескольких десятков метров в год (Горбунов, 2016). Внутреннее строение каменных глетчеров — это прочно сцементированная льдом грубообломочная матрица. Содержание льда в отдельных каменных глетчерах может достигать порядка 70 % от его объёма (Haeberli et al., 2006).

Каменные глетчеры — наиболее выразительное проявление горной криолитозоны, быстро реагирующее на климатические изменения, причём реакция каменных глетчеров

и обычных ледников может быть противоположной. Если в настоящее время во многих горных областях ледники быстро теряют объём, то каменные глетчеры за счёт мощного валунно-глыбового чехла сохраняют незатронутым своё льдистое ядро. Такая тенденция в последующие десятилетия может увеличить роль каменных глетчеров как одного из крупных источников пресной воды в засушливых и полусушливых районах. Поэтому количественная оценка каменных глетчеров, изучение внутреннего строения и влияния каменных глетчеров на сток горных рек — крайне важные задачи современной геоморфологии (Jones et al., 2019).

На территории России каменные глетчеры встречаются во многих горных массивах (Горбунов, 2006). В российской части Северной Азии наиболее изучена прибрежная 200–400-километровая зона Охотского и Берингова морей, к которым относятся Чукотское, Корякское нагорья, Северное Приохотье, Колымское нагорье, хр. Сунтар-Хаята и др. Здесь установлено более 7000 каменных глетчеров различных морфологических типов. Они приурочены к гипсометрическому интервалу от 0 до 2300 м, однако большая их часть сосредоточена в пределах 600–1400 м над уровнем моря (н. у. м.). Здесь встречаются все типы каменных глетчеров (Галанин, 2009, 2012, 2017; Лыткин, Галанин, 2016). На северо-востоке России наименее изученными остаются каменные глетчеры хребтов Черского, Сунтар-Хаята, Верхоянского, Момского и др.

Цель настоящей работы состоит в обсуждении новых данных о распространении каменных глетчеров в горных районах северо-востока Якутии, полученных на основе дешифрирования спутниковых изображений и цифровой модели рельефа. Результаты картографирования были протестированы натурными наблюдениями в осевых частях хребтов Черского и Сунтар-Хаята.

Район исследований

Исследуемая территория включает четыре крупных горных массива: Черский, Сунтар-Хаята, Верхоянский и Момский (рис. 1). Рассмотренные горные районы в осевых частях имеют альпинотипный рельеф с острыми гребнями и вершинами с множеством каров и цирков. В некоторых горных узлах развито современное оледенение карового и карово-долинного типа, площадь которого в начале XXI в. составляла 296 км² (Ananicheva et al., 2010).

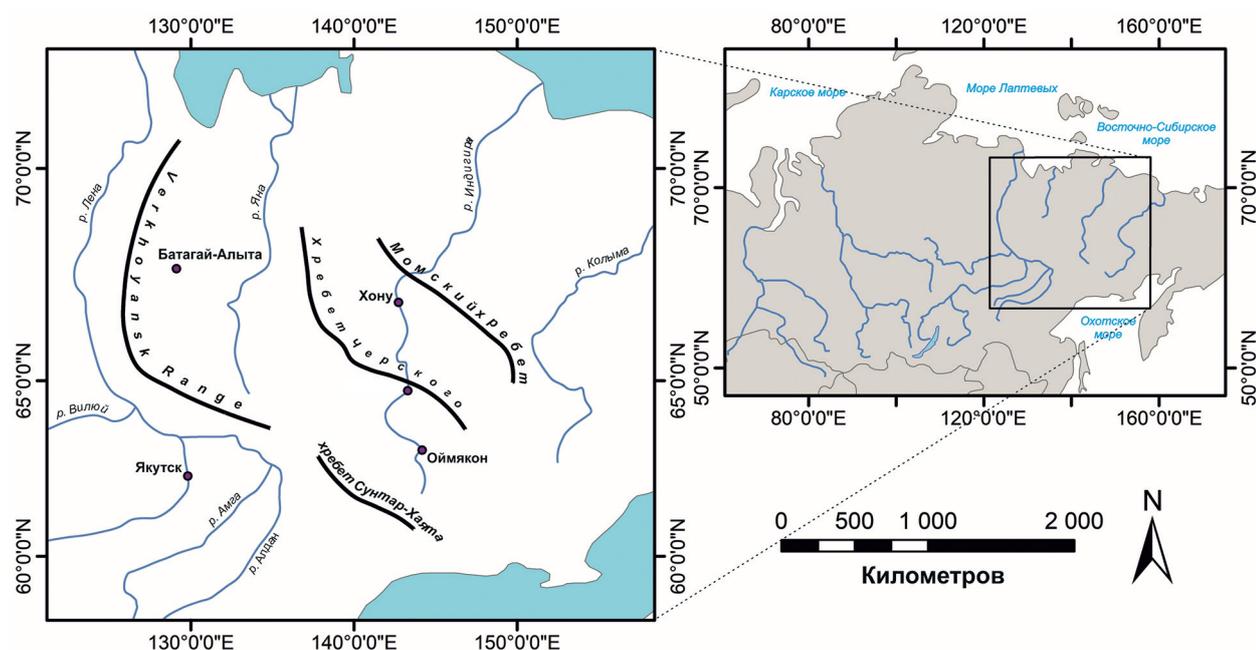


Рис. 1. Картограмма района исследований. Чёрной линией выделены водораздельные части горных массивов

Максимальные высоты достигают 3003 м (хр. Черского), 2959 м (хр. Сунтар-Хаята), 2533 м (Момский хр.) и 2390 м (Верхоянский хр.). Климат резко континентальный с среднегодовыми температурами в пределах $-12,6...-14,2$ °С с ярко выраженной высотной инверсией. Это сказывается на количестве осадков, которое достигает в области питания современных ледников 900 мм/год (Корейша, 1963). Данные горные хребты находятся в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП) мощностью от 200 до 600 м с температурой от -4 до $-10,5$ °С (Некрасов, 1976).

Методика исследований

Выполненные исследования методически основываются на ранее проведённых работах, посвящённых картографированию каменных глетчеров отдельных горных районов мира (Jones et al., 2018; Pandey, 2019), и отдельно проработанных нами для изучения каменных глетчеров хр. Сунтар-Хаята (Лыткин, Галанин, 2016). Для картографирования каменных глетчеров был использован сервис ArcGis Online (ESRI), в котором доступны космические снимки высокого разрешения компании Spot Image (Франция) и некоторые продукты компании DigitalGlobe (США). Разрешение космических изображений составляет от 0,3 до 2,5 м/пиксель. Космические изображения высокого разрешения были применены ранее для картографирования каменных глетчеров в отдельных горных районах (Rangecroft et al., 2014; Schmid et al., 2015).

Снимки автоматически загружаются в единый растровый слой для всей площади исследуемого района в программном обеспечении ArcMap 10.1. Изображения выбирались таким образом, чтобы на них было минимально допустимое значение облачности — не более 10 %. Процесс картографирования предусматривал работу с смонтированными космическими снимками. При дешифрировании обнаруженные каменные глетчеры идентифицировались вручную и оцифровывались геопривязанными полигонами в векторном слое. Для каждого каменного глетчера оцифровывалась поверхность от бровки до тылового шва коренного склона (Jones et al., 2018; Pandey, 2019). Расчёты площади выполнены автоматически с использованием встроенных модулей ArcMap (рис. 2).

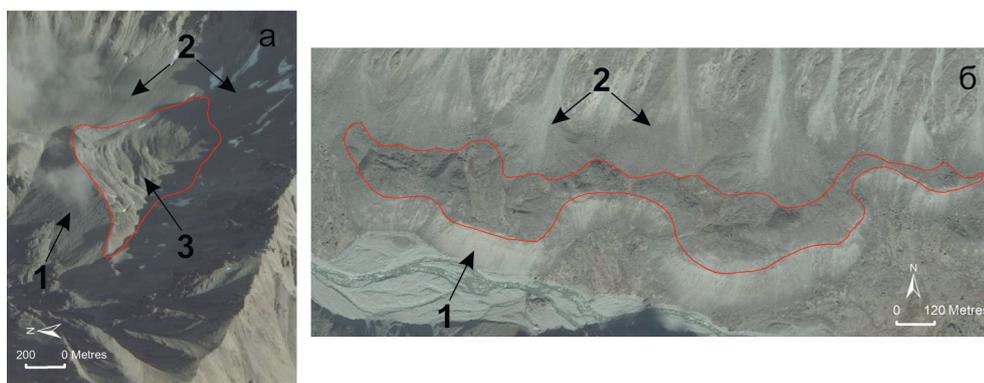


Рис. 2. Пример дешифрирования поверхности каровых (а) и присклоновых (б) каменных глетчеров. Красной линией обведена поверхность каменного глетчера. 1 — фронтальный откос; 2 — область питания (осыпной склон); 3 — поперечные валы

При картографировании каменных глетчеров мы использовали классификацию, разработанную Д. Баршем (Barsch, 1996), а также некоторые таксономические наименования, детально обсуждённые ранее (Галанин, 2010). Всего выделено два типа каменных глетчеров по отношению к вмещающему рельефу (присклоновый, каровый).

Присклоновые каменные глетчеры формируются в бортах плейстоценовых трогов, и они хорошо различаются на космических изображениях. Фронт каменных глетчеров изгибается

в виде серповидной лопасти, на поверхности появляются системы параллельных гряд. Каждая крупная лопасть каменных глетчеров, как правило, питается из одного-двух осыпных конусов. На участках протяжённых крутых склонов, питающих множество осыпных конусов, формируется большое количество близкорасположенных лопастных каменных глетчеров, часть из которых сливается боковыми краями, формируя сложный полилопастный каменный глетчер. Каровые каменные глетчеры формируются внутри каров и напоминают ледник, покрытый мощным чехлом обломочного материала. На поверхности образуются системы параллельных гряд, а также сохраняются некоторые ледниковой морфоскульптуры: краевой канал стока, небольшие фирновые бассейны и присклоновые трещины.

Для оценки высотных характеристик каменных глетчеров использована цифровая модель рельефа GMTED2010 с пространственным разрешением 30 м. Определение высоты каждого каменного глетчера было выполнено путём автоматического присвоения ему значений высотного раstra в виде дополнительных атрибутов с использованием инструмента ArcMap Spatial Analyst.

Результаты и обсуждения

Всего было картографировано 4503 каменных глетчера с общей площадью 224,6 км², которые расположены в пределах абсолютных высот от 503 до 2496 м н.у.м. (рис. 3).

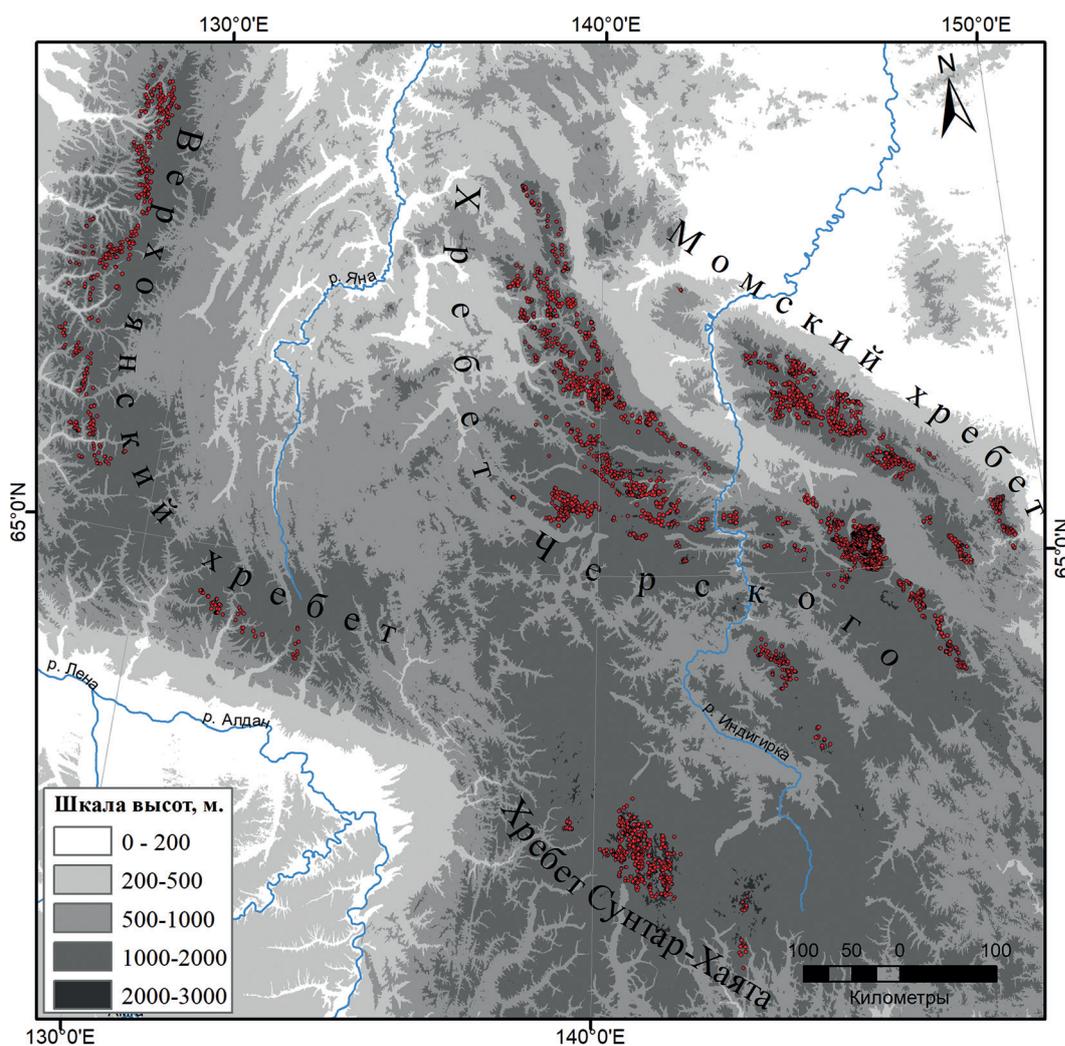


Рис. 3. Распределение каменных глетчеров на исследуемой территории. Дешифрованные каменные глетчеры обозначены красным кружком

Средняя площадь каменных глетчеров составляет $0,05 \text{ км}^2$, максимальная — $1,25 \text{ км}^2$, тогда как самый маленький каменный глетчер имеет площадь 500 м^2 . Большая их часть располагается в бортах троговых долин, образуя протяжённые присклоновые каменные глетчеры. Всего установлено 3595 присклоновых образований общей площадью $152,2 \text{ км}^2$ (таблица). Среди присклоновых преобладают каменные глетчеры, состоящие из нескольких лопастей (полилопастые), которые могут достигать в ширину до 1 км. Распределение каменных глетчеров по горным хребтам неоднородно: 55 % выявленных образований располагается в хр. Черского, в Верхоянском хр. — 12,2 %, в хр. Сунтар-Хаята — 11,7 % и в Момском хр. — 5,5 %.

Распределение площади и высотные значения каменных глетчеров

Тип каменного глетчера	Количество	Площадь, км^2	Высота, м н. у. м		
			средняя	минимальная	максимальная
Все типы	4503	224,6	1490	503	2496
Присклоновые	3595	152,2	1448	503	2496
Каровые	908	72,4	1655	867	2466

Среди ранее исследованных горных районов мира (Jones et al., 2019) северо-восток Якутии является одной из крупных территорий распространения каменных глетчеров. Этому способствует развитие сплошной криолитозоны и достаточно сурового высокогорного климата (Haerberli et al., 2006). Как правило, изученные в полевых условиях присклоновые каменные глетчеры питались несколькими лавино-осыпными конусами, а поверхность сложена в большей части некрупными валунами и щебнем. С другой стороны, наличие низкотемпературной криолитозоны и сурового климата сильно влияет на скорость движения каменных глетчеров. Так, проведённые исследования по оценке скорости движения каменных глетчеров присклонового типа в Шпицбергене показали, что они двигаются со скоростью менее 1 см/год (Kääb et al., 2002). Морфология изученных нами глетчеров сходна с их аналогами в Шпицбергене, это может говорить о том, что здесь они тоже малоактивны. Косвенными признаками слабой активности этих образований в изучаемом регионе служит наличие закреплённых луговой растительностью участков на крутых фронтальных откосах многих каменных глетчеров, которые мы наблюдали во время полевых исследований. Крутые фронтальные откосы также свидетельствуют о высокой их льдистости, которая может достигать до 70 % от тела каменного глетчера (Haerberli et al., 2006). Результаты изучения внутреннего строения каменных глетчеров хр. Черского методом электротомографии, а также мониторинг за температурой водного стока указывают на высокое содержание грунтового льда (Бажин, Лыткин, 2018).

Выводы

На основе спутниковых данных высокого разрешения, доступных в сервере программы ArcMap 10.1, выполнен дистанционный мониторинг малоизученных объектов перигляциального пояса горных сооружений северо-восточной Якутии. Всего было установлено 4503 образования общей площадью $224,6 \text{ км}^2$. С помощью цифровой модели рельефа установлено, что они распределены в интервале абсолютных высот от 503 до 2496 м. Среди ранее исследованных горных районов мира северо-восток Якутии является одной из крупных зон распространения каменных глетчеров. Этому способствует развитие на исследованной территории сплошной криолитозоны и достаточно холодного высокогорного климата.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-35-00402 мол_а.

Литература

1. *Бажин К. И., Лыткин В. М.* Изучение внутреннего строения каменного глетчера хребта Черского с использованием метода электротомографии // 9-я Сибирская конф. молодых ученых по наукам о Земле: сб. материалов. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2018. С. 39–41.
2. *Галанин А. А.* Каменные глетчеры северо-востока Азии: картографирование и географический анализ // Криосфера Земли. 2009. Т. 13. № 4. С. 49–61.
3. *Галанин А. А.* Каменные глетчеры: вопросы терминологии и классификации // Вестн. Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2010. № 4. С. 2–11.
4. *Галанин А. А.* Каменные глетчеры Колымского нагорья // Лёд и Снег. 2012. Т. 52. № 2. С. 106–114.
5. *Галанин А. А.* Каменные глетчеры южной части Чукотского полуострова // Геоморфология. 2017. № 1. С. 66–79.
6. *Горбунов А. П.* Каменные глетчеры Азиатской России // Криосфера Земли. 2006. Т. 10. № 1. С. 22–28.
7. *Корейша М. М.* Современное оледенение хребта Сунтар-Хаята. Сер. 11: Гляциология. М.: Изд-во АН СССР. 1963. 169 с.
8. *Лыткин В. М., Галанин А. А.* Каменные глетчеры хребта Сунтар-Хаята // Лёд и снег. 2016. Т. 56. № 4. С. 511–524.
9. *Некрасов И. А.* Криолитозона Северо-Востока и Юга Сибири и закономерности её развития. Якутск: Якутское кн. изд-во, 1976. 248 с.
10. *Ananicheva M. D., Krenke A. N., Barry R. G.* The Northeast Asia mountain glaciers in the near future by AOGCM scenarios // The Cryosphere. 2010. V. 4. P. 435–445.
11. *Barsch D.* Rockglaciers: Indicators for the Present and Former Geocology in High Mountain Environments. Series in the Physical Environment. Berlin, Germany: Springer, 1996. 331 p.
12. *Haeblerli W., Hallet B., Arenson L., Elconin R., Humlum O., Kääb A., Kaufmann V., Ladanyi B., Matsuzaka N., Springman S. M.* Permafrost creep and rock glacier dynamics // Permafrost and Periglacial Processes. 2006. V. 17. No. 3. P. 189–214.
13. *Jones D. B., Harrison S., Anderson K., Selley H. L., Wood J. L., Betts R. A.* The distribution and hydrological significance of rock glaciers in the Nepalese Himalaya // Global and Planetary Change. 2018. V. 160. P. 123–142.
14. *Jones D. B., Harrison S., Anderson K., Whalley W. B.* Rock glaciers and mountain hydrology: A review // Earth-Science Reviews. 2019. V. 193. P. 66–90.
15. *Kääb A., Isaksen K., Eiken T., Farbrot H.* Geometry and dynamics of two lobe-shaped rock glaciers in the permafrost of Svalbard // Norsk Geografisk Tidsskrift–Norwegian J. Geography. 2002. V. 56. No. 2. P. 152–160.
16. *Pandey P.* Inventory of rock glaciers in Himachal Himalaya, India using high-resolution Google Earth imagery // Geomorphology. 2019. V. 340. P. 103–115.
17. *Rangecroft S., Harrison S., Anderson K., Magrath J., Castel A. P., Pacheco P.* A first rock glacier inventory for the Bolivian Andes // Permafrost and Periglacial Process. 2014. V. 25. No. 4. P. 333–343.
18. *Schmid M. O., Baral P., Gruber S., Shahi S., Shrestha T., Stumm D., Wester P.* Assessment of permafrost distribution maps in the Hindu Kush Himalayan region using rock glaciers mapped in Google Earth // The Cryosphere. 2015. V. 9. No. 6. P. 2089–2099.

Rock glaciers of mountain structures in northeastern Yakutia

V. M. Lytkin

*Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk 677010, Russia
E-mail: gidro1967@mail.ru*

Rock glaciers are common forms of relief of the periglacial belt of many mountain structures in the world. They are potential sources of water in arid and semi-arid regions and therefore their analysis is important in assessing water reserves. Mountain structures in the northeast of Yakutia have optimal conditions for the formation of rock glaciers, but they have not yet been studied in this regard. In this paper, for the first time, we present a detailed list of rock glaciers in this region. Using geoinformation mapping based on remote sensing data of the Earth within the Chersky, Verkhoyansk, Momsky and Suntar-Khayat ranges, 4503 rock glaciers with a total area of 224.6 km² were discovered. They are

located within absolute altitudes from 503 to 2496 m. Their average minimum altitude was at 1456 m above sea level, and the maximum at 1527 m. Most of these formations are located on the sides of the trough valleys and form extended sloping types of rock glaciers. The distribution of rock glaciers over the mountain ranges is heterogeneous, 55 % of the decrypted formations are located in the Chersky Range, 12.2 % in the Verkhoyansk Range, 11.7 % in the Suntar-Khayat Range, and 5.5 % in the Minsky Range.

Keywords: rock glacier, remote sensing, permafrost, inventory

Accepted: 17.06.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-91-97

References

1. Bazhin K. I., Lytkin V. M., Izuchenie vnutrennego stroeniya kamennogo gletchera khrebta Cherskogo s ispol'zovaniem metoda elektrotomografii (The study of the internal structure of the stone glacier of the Chersky ridge using the method of electrotomography), *9-aya Sibirskaya konferentsiya molodykh uchennykh po naukam o Zemle, sb. materialov* (9th Siberian Conf. Young Scientists on Earth Sciences: Proc. Conf.), Novosibirsk: IPTs NGU, 2018, pp. 39–41.
2. Galanin A. A., Kamennye gletchery severo-vostoka Azii: kartografirovanie i geograficheskii analiz (Rock glaciers of north-eastern Asia: mapping and geographical analysis), *Kriosfera Zemli*, 2009, Vol. 13, No. 4, pp. 49–61.
3. Galanin A. A., Kamennye gletchery: voprosy terminologii i klassifikatsii (Rock glaciers: issues of terminology and classification), *Vestnik Severo-Vostochnogo Nauchnogo Tsentra DVO RAN*, 2010, No. 4, pp. 2–11.
4. Galanin A. A. Kamennye gletchery Kolymnskogo nagorya (Rock glaciers in the Kolyma highland), *Led i Sneg*, 2012, Vol. 52, No. 2, pp. 106–114.
5. Galanin A. A., Kamennye gletchery yuzhnoi chasti Chukotskogo poluostrova (Rock glaciers in the southern Chukchi Peninsula), *Geomorfologiya*, 2017, No. 1, pp. 66–79.
6. Gorbunov A. P., Kamennye gletchery Aziatskoi Rossii (Rock glaciers of the Asian Russia), *Kriosfera Zemli*, 2006, Vol. 10, No. 1, pp. 22–28.
7. Koreysha M. M., *Sovremennoe oledenenie khrebta Suntar-Khayata. Ser. 11: Glyatsiologiya* (Modern glaciation in the Suntar-Khayata Range. Ser. 11: Glaciology), Moscow: Izd. AN SSSR, 1963, 169 p.
8. Lytkin V. M., Galanin A. A., Kamennye gletchery khrebta Suntar-Khayata (Rock glaciers in the Suntar-Khayata Range), *Led i Sneg*, 2016, Vol. 54, No. 4, pp. 511–524.
9. Nekrasov I. A., *Kriolitozona Severo-Vostoka i Yuga Sibiri i zakonomernosti ee razvitiya* (Permafrost of the North-South and East Siberia and the laws of its development), Yakutsk: Yakutskoe knizhnoe izd., 1976, 248 p.
10. Ananicheva M. D., Krenke A. N., Barry R. G., The Northeast Asia mountain glaciers in the near future by AOGCM scenarios, *The Cryosphere*, 2010, Vol. 4, pp. 435–445.
11. Barsch D., *Rockglaciers: Indicators for the Present and Former Geocology in High Mountain Environments, Series in the Physical Environment*, Berlin, Germany: Springer, 1996, 331 p.
12. Haerberli W., Hallet B., Arenson L., Elconin R., Humlum O., Kääb A., Kaufmann V., Ladanyi B., Matsuo-ka N., Springman S. M., Permafrost creep and rock glacier dynamics, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2006, Vol. 17, No. 3, pp. 189–214.
13. Jones D. B., Harrison S., Anderson K., Selley H. L., Wood J. L., Betts R. A., The distribution and hydrological significance of rock glaciers in the Nepalese Himalaya, *Global and Planetary Change*, 2018, Vol. 160, pp. 123–142.
14. Jones D. B., Harrison S., Anderson K., Whalley W. B., Rock glaciers and mountain hydrology: A review, *Earth-Science Reviews*, 2019, Vol. 193, pp. 66–90.
15. Kääb A., Isaksen K., Eiken T., Farbrot H., Geometry and dynamics of two lobe-shaped rock glaciers in the permafrost of Svalbard, *Norsk Geografisk Tidsskrift-Norwegian J. Geography*, 2002, Vol. 56, No. 2, pp. 152–160.
16. Pandey P., Inventory of rock glaciers in Himachal Himalaya, India using high-resolution Google Earth imagery, *Geomorphology*, 2019, Vol. 340, pp. 103–115.
17. Rangelcroft S., Harrison S., Anderson K., Magrath J., Castel A. P., Pacheco P., A first rock glacier inventory for the Bolivian Andes, *Permafrost and Periglacial Process*, 2014, Vol. 25, No. 4, pp. 333–343.
18. Schmid M. O., Baral P., Gruber S., Shahi S., Shrestha T., Stumm D., Wester P., Assessment of permafrost distribution maps in the Hindu Kush Himalayan region using rock glaciers mapped in Google Earth, *The Cryosphere*, 2015, Vol. 9, No. 6, pp. 2089–2099.