

ПОЗДНЕГОЛОЦЕНОВАЯ ИСТОРИЯ ЛЕДНИКА ШХЕЛЬДА, СЕВЕРНЫЙ КАВКАЗ, ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ, ДЕНДРОХРОНОЛОГИИ И КОСМОГЕННОГО (^{10}Be) ДАТИРОВАНИЯ МОРЕН

© 2024 г. О. Н. Соломина^{1,2}, И. С. Бушуева^{1,*}, В. Джомелли³

¹Институт географии Российской академии наук, Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

³Университет Экс-Марсель, Марсель, Франция

*e-mail: irinasbushueva@gmail.com

Поступила 03.09.2024 г.

После доработки 13.09.2024 г.

Принята к печати 07.10.2024 г.

По данным дистанционного зондирования, картографии, дендрохронологии и анализа космогенных изотопов (^{10}Be) установлены границы ледника Шхельда в 1880-х–2022 годах, во время наступаний в XIX в., а также около 0.5, 0.89 и 1.4–1.6 тыс. л.н.

Ключевые слова: колебания ледников, морены, космогенные изотопы, дендрохронология, малый ледниковый период, позднеантичный малый ледниковый период

DOI: 10.31857/S2076673424040123, EDN: HSWZYO

ВВЕДЕНИЕ

Ледник Шхельда (43.18 N, 42.64 E) – он же ледник Адыл или Шхильды, многократно был описан исследователями, посещавшими его начиная со второй половины XIX в. (Динник, 1884; Мушкетов, 1899; Ренгартен, 1895; Буш, 1914; Альтбрег, 1928; Демченко, 1952; Ковалев, 1961; Никулин, Трошкина, 1974; Baume, Marcinek, 1998; Сейнова, Золотарев, 2001).

Одна из его главных отличительных особенностей – мощный чехол поверхностной морены, покрывающий язык. Предполагается (Сейнова, Золотарев, 2001), что из-за этой его особенности динамика ледника существенно отличается от остальных ледников региона. Так, для него, например, не зафиксировано улучшения состояния в 1960–70-е годы, когда климат на Кавказе стал несколько более благоприятным для ледников. С другой стороны, он продолжал наступать в 1880–1910-е годы, когда большинство ледников региона постепенно уменьшались в размерах после достижения своего максимума в малом ледниковом периоде ранее XIX в.

В работе приводится реконструкция положения фронта ледника по данным дешифрирования аэрофото-, космических снимков, старых карт и

первые определения возраста морен ледника по космогенным изотопам; рассмотрены также результаты наших дендрохронологических и лихенометрических исследований.

Главная цель исследования – определение возраста позднеголоценовых морен ледника Шхельда. Это позволит в какой-то мере ответить на вопрос о том, насколько своеобразна динамика ледника, язык которого забронирован поверхностной мореной, и отличается ли она от других ледников региона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Метод датирования с помощью космогенных изотопов в последние десятилетия широко применяется для определения возраста ледниковых отложений во всем мире. На Кавказе пока имеются лишь первые, немногочисленные датировки голоценовых морен (Solomina et al., 2016, Solomina et al., 2024).

Основу метода составляет измерение содержания изотопов некоторых элементов (например, ^{10}Be , ^{36}Cl), которые накапливаются в поверхностных слоях горных пород, например, в кварце (Balco, 2011). Поток космических лучей, проникающая вглубь экспонированной поверхности, быстро

уменьшается с глубиной в соответствии с экспоненциальной зависимостью. Концентрация космогенных нуклидов в породе пропорциональна продолжительности времени, в течение которого образец находился на поверхности земли. Скорость производства космогенных нуклидов зависит от высоты над уровнем моря (экранирующий эффект атмосферы) и магнитного поля Земли (геомагнитная широта).

Картирование мест отбора образцов и соответствующих морен проводилось в полевых условиях с помощью GPS-прибора Garmin (точность 10 м) (табл. 1). С помощью молотка и зубила на гребнях морен были отобраны образцы с гранитных валунов, которые возвышались более чем на 60 см над поверхностью. Для измерения топографического экранирования каждого образца в полевых условиях использовался клинометр Suunto Compass Clinometer PM-5.

Все образцы были обработаны в лаборатории CEREGE (Экс-ан-Прованс, Франция). Образцы были измельчены и просеяны до фракции 250–1000 мкм. Кварц сначала концентрировали путём магнитной сепарации, а затем выделяли путем последовательного выщелачивания в смеси $\text{H}_2\text{SiF}_6/\text{HCl}$. Полученную фракцию кварца выщелачивали не менее трех раз в растворе 10% HF – 10% HNO_3 , чтобы удалить оставшиеся полевые шпаты и очистить зерна от атмосферного ^{10}Be . Очищенный кварц полностью растворяли в концентрированной HF после добавления 150 мкл раствора ^9Be (3025 ± 9 ppm; Merchel et al., 2008). Бериллий извлекали последовательным щелочным осаждением $\text{Be}(\text{OH})_2$, чередуя с разделением на анионных и катионных колонках. Затем образцы окисляли при 700 °C в течение одного часа, а конечный BeO смешивали с порошком Nb и загружали в медные катоды. Измерения соотношения $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ методом AMS проводились на французской установке AMS

ASTER (Arnold et al., 2010). Образцы калибровали по собственному стандарту STD-11 ($^{10}\text{Be}/^9\text{Be} = 1.191 \pm 0.013 \cdot 10^{-11}$; Braucher et al., 2015) и периода полураспада ^{10}Be $1.387 \pm 0.0012 \cdot 10^6$ лет (Chmeleff et al., 2010; Korschinek et al., 2010). Аналитическая ошибка включают статистику подсчета ASTER, стандартную неопределённость, внешнюю неопределённость (0.5%; Arnold et al., 2010) и коррекцию машинного холостого хода. Концентрация ^{10}Be в образце, рассчитанная по соотношению $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$, была скорректирована по соответствующим химическим пробам (см. табл. 1). Коррекция на месторасположение проб была выполнена в соответствии с физически обоснованной моделью LSD (Lifton et al., 2014), которая работает аналогично эмпирическим моделям (Borchers et al., 2016). Параметры модели включают атмосферный реанализ ERA40 (Uppala et al., 2005) и геомагнитную базу данных VDM 2016. Мы использовали глобальную скорость производства нуклидов (PR), поскольку региональная PR пока недоступна. Расчеты возраста морен были сделаны с помощью онлайн-программы CREP (Martin et al., 2017; <http://crep.crpge.cnrs-nancy.fr>) и представлены в табл. 1.

Возраст ^{10}Be указан с ошибкой в 1σ , которая включает неопределённости измерения, скорости производства нуклидов и масштабирования (например, Balco et al., 2008). В ходе полевых исследований мы также рассматривали геоморфологические особенности долины для выявления возможных ошибочных определений возраста морен по космогенным датировкам.

Аэрофотоснимки привязывались к эталонному изображению в два этапа. В качестве эталонного был выбран высокодетальный снимок, полученный космическим аппаратом GeoEye-1 4.10.2014 г. На первом этапе все аэрофотоснимки были ортотрансформированы с использованием контрольных

Таблица 1. Результаты датирования образцов по космогенным изотопам ^{10}Be

Название образца		Долгота, °	Широта, °	Высота, м	Концентрация ¹⁰ Be, ат/г, атомов/грамм	Погрешность/ошибка, ат/г	Коррекция экранирования	Плотность породы, г/см ³	Коррекция толщины образца	Скорость эрозии, см/г	Возраст, тыс. л.н.	Ошибка 1σ, тыс. л.н.
sh1	SH20	43.21	42.65039	2209	3248	438.1	0.9367	2.75	3	0	0.16	0.02
sh2	Sh25	43.21055	42.65042	2209	10818.4	1645.5	0.9573	2.75	3	0	0.5	0.08
sh3	SH24	43.21055	42.65042	2207	19750.2	4189.5	0.99	2.75	2	0	0.89	0.22
sh4	SH19	43.21091	42.65052	2207	29762.5	4938	0.99	2.75	2	0	1.42	0.29
sh5	SH22	43.20988	42.64984	2221	31967.3	3739	0.96	2.75	3	0	1.6	0.25
sh6	SH21	43.21088	42.65077	2208	31704.8	3555.3	0.9573	2.75	3	0	1.62	0.24

точек и цифровой модели рельефа SRTM v.3. На втором этапе проводилось уточнение геопривязки с помощью нового набора контрольных точек и метода сплайн. Таким образом достигалась точность корегистрации в несколько пикселей. Используемые космические снимки уже были ортотрансформированы, поэтому при необходимости уточнение корегистрации проводилось по контрольным точкам. Для повышения точности дешифрирования границ ледника в XXI в. мы обрабатывали интерферометрические пары снимков, сделанные космическим аппаратом Sentinel-1A в 2015 (18–30 августа) и 2022 (29 августа – 10 сентября) гг. На основе этих пар снимков были посчитаны когерентности, которые показывают, изменилась ли территория между датами съемки. За счет движения льда ледник имеет низкую когерентность, в то же время снижение когерентности может быть вызвано и оползнями, и просто сильным таянием мертвого льда, и т.п., поэтому известная доля неопределенности наших заключений в этом отношении сохраняется.

Карты Бурместера (1911 г.) и военных топографов (1887 г.) мы привязывали по характерным особенностям рельефа (скалы, выступы, впадение рек и т.п.), а также обращались к фотографиям, сделанным в годы создания карт. Хотя точность привязки довольно низкая, для приблизительных оценок динамики конца ледника она достаточна.

Лихенометрический и дендрохронологический методы применительно к определению возраста морен Кавказа описаны, например, в работе (Solomina et al., 2016). Мы используем классическую модель определения возраста с помощью лихенометрии (см., например, Innes, 1985) – измеряем размеры максимальных лишайников *Rhizocarpon geographicum sensu lato* на всей поверхности датируемой формы рельефа и в качестве основного индикатора используем диаметр одного максимального лишайника, если он не превосходит следующий по размеру более чем на 20%. В противном случае он считается аномальным и за основу расчетов принимается следующий по размеру лишайник. Несмотря на критику этого метода (см., например, Osborn et al., 2015), мы считаем, что для приблизительных оценок и относительного датирования ледниковых форм рельефа, этот метод пригоден.

Дендрохронологический метод дает возможность оценить минимальный возраст экспонирования поверхности. На Кавказе он применяется для датирования молодых отложений возрастом до 200–300 лет (Solomina et al., 2016). Для определения минимального возраста той формы рельефа, на которой растет дерево (в нашем случае это сосна обыкновенная *Pinus sylvestris*), к возрасту дерева необходимо прибавить 10–20 лет, которые требуются для пионерного заселения поверхности.

Кроме того, следует добавить 10–20 лет – поправку на высоту бурения. Итоговая поправка минимального дендрохронологического возраста морены в этой работе принята в 20–30 лет. Отмечено, что минимальный и истинный возраст датируемой поверхности, даже относительно молодой, может существенно различаться, особенно там, где ощутимо антропогенное воздействие на лес.

Образцы на дендрохронологический анализ были отобраны на предпольях ледника и на моренах левого борта долины в 2004 и 2023 гг. (табл. 2). Лихенометрические исследования проведены также в 2004 г. В это время мы не имели возможности точно определить координаты точек, но наши измерения привязаны в пространстве к определенным формам рельефа, которые были описаны в 2004 г. в полевых условиях (см. табл. 2). Группой В. Джомелли в 2016 г. с конечных морен левого борта и отобрано шесть образцов на анализ космогенных изотопов (см. табл. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Особенности ледника и его краткая история с конца XIX в. Определение границ ледника Шхельда представляет довольно большую сложность, так как нижняя часть его языка, покрытая поверхностной мореной с огромными глыбами до 20 м в диаметре, скорее всего представляет собой мертвый лед, хотя ледяной обрыв, расположенный на высоте 2440 м в 2004 г. снизу выглядел как настоящий фронт ледника (рис. 1, а). Этот феномен описал еще в 1950-х годах П.В. Ковалев: «Примерно в километре выше конца языка находится ледяной обрыв, являющийся как бы вторым языком» (с. 67). Кроме того, интересной особенностью Шхельды является «серповидная морена», которая показана на карте Г. Бурместера 1911 г. (Burmester, 1913) на высоте 2630 м в верхней части языка ледника. С 1911 по 1959 г. она спустилась вниз на 970 м, в 1959–1979 гг. – еще на 60 м (Сейнова, Золотарев, 2001). Темпы перемещения этой морены, по нашим данным, представлены на рис. 2. Вал хорошо читается на всех снимках вплоть до 2014 г., когда морена располагалась около самого края ледника и уже начала осыпаться с обрыва. В 2022 г. ее на снимках уже нет (источник: Google Earth).

Возможно, происхождение этой морены и исключительно мощный чехол поверхностной морены на языке ледника в целом связаны с обвалом, в результате которого на поверхность льда обрушилась большая масса обломков и забронировала лед. Этой версии придерживается значительная часть исследователей (Динник, 1884; Альтбег, 1928; Никулин, Трошкина, 1974; Сейнова, Золотарев, 2001). Судя по рассказам местных жителей, обвал произошел в 1863 г. Динник (1884) приводит яркое описание этого обвала, который, как он пишет,

Таблица 2. Минимальный возраст морен ледника Шхельда

Точки	Даты
<i>Береговые морены</i>	
L1	1918 (1916) 1892 (1890) 1924 (1922) 1925 (1924)
L2	1916 (1914) 1926 (1924) 1925 (1922) 1930 (1929) 1930 (1928)
L3	1881 (1880) 1883 (1881) 1934 (1931) 1894 (1893)
L4	1888 (1887) 1895 (1895) 1892 (1891) 1918 (1918) 1881 (1880) 1881 (1880)
L5	1904 (1900) 1888 (1887) 1889 (1887) 1822 (1820) 1893 (1890) 1823 (1823) 1865 (1865) 1955 (1954)
Склон выше L5	1851 (1850) 1870 (1869) 1887 (1887) 1892 (1892)
<i>Конечные морены</i>	
M1 (1920-е гг.)	1977 (1976) 1973 (1972) 1968 (1966) 1980 (1976) 1982 (1981)
M2	1955 (1954) 1934 (1933) 1953 (1951) 1916 (1914) 1941 (1936) 1979 (1975) 1958 (1956) 1967 (1964) 1919 (1916) 1926 (1924)
M3	1960 (1959) 1918 (1917) 1920 (1919) 1945 (1940) 1891 (1890) 1909 (1904) 1921 (1917) 1981 (1979) 1963 (1961)
M4	1937 (1936) 1897 (1892) 1891 (1889) 1935 (1932) 1894 1943 (1941) 1876 (1874)

Номера морен соответствуют рис. 1. Годы — возраст первого годичного кольца, в скобках — с поправкой на недостающие кольца из-за неточности попадания в сердцевину при бурении. Жирным шрифтом выделен возраст самых старых деревьев. Для определения минимального возраста собственно морены от возраста самого старого дерева необходимо вычесть 20–30 лет (см. пояснения в тексте).

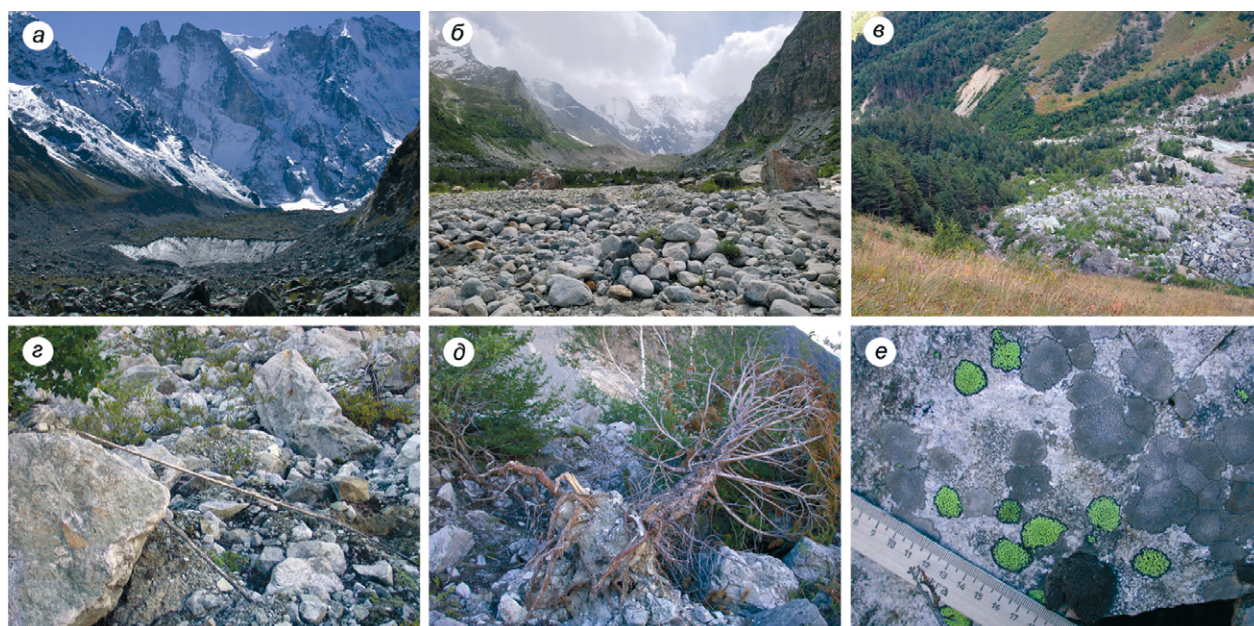


Рис. 1. Фотографии долины ледника Шхельда: *а* — общий вид долины Шхельда с обрывом мертвого льда, 14 сентября 2004 (фотография В. Джомелли); *б* — фотография В.Н. Михаленко, 12 июля 2023 г.; *в* — морена М1, 30 августа 2009 г. (фотография В. Джомелли); *г* — береза с удлинёнными корнями на нестабильной поверхности мертвого льда; *д* — погибшая сосна на языке мертвого льда; *е* — лишайники на той же поверхности

Fig. 1. Photos of Shkhelda Glacier valley.

a — General view of the Shkhelda valley with dead ice cliff, September 14, 2004 (photo by V. Jomelli); *б* — photo by V. Mikhailenko, July 12, 2023; *в* — M1 moraine, August 30, 2009 (photo by V. Jomelli); *г* — birch with elongated roots on unstable surface of dead ice; *д* — dead pine on dead ice tongue; *е* — lichens on the same surface

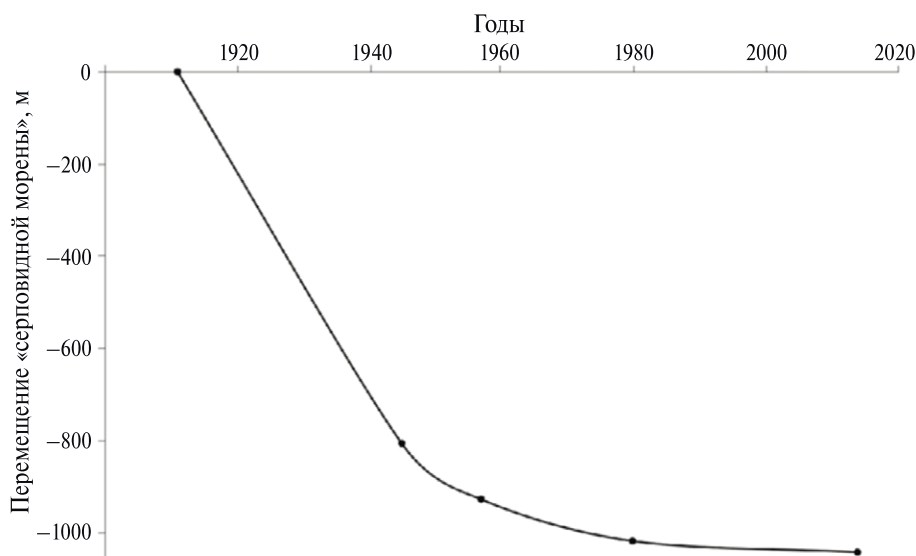


Рис. 2. Перемещение «серповидной морены» по поверхности ледника Шхельды

Fig. 2. Movement of the “sickle-shaped moraine” on the surface of the Shkhelda Glacier

в частности, уничтожил взрослый сосновый лес на 4 версты ниже по долине.

Другая группа исследователей (Burmester, 1913; Ковалев, 1961) считает, что поверхностная морена Шхельды формируется обычным способом — путем слияния срединных и боковых морен. Ковалев (1961) рассчитал, что материал обвала, который, по данным Динника, случился в 1863 г., к 1959 г. должен был передвинуться в нижнюю часть языка, и освободить то место, куда он попал при обвале. Между тем этого не произошло — язык остается забронированным и сегодня.

Исследователи, посетившие ледник в конце XIX — начале XX веков, отмечали его необычное поведение: на фоне общего тренда сокращения ледников Кавказа в это время, по данным Мушкетова (1899), в 1897 г. ледник наступал; Поггенполь (Демченко, 1952) отмечал наступание в 1905 г., Буш (1914) — в 1911 г., Ренгартен (1915) — в 1913–1914 гг. Это подтверждается и нашим анализом положения конца ледника на картах военных топографов (Карта военных топографов, 1887) и Бурместера (Burmester, 1913). На карте военных топографов конец ледника показан на высоте чуть выше отметки в 1035 саженей (≈ 2208 м) (рис. 4; табл. 3), на карте Бурместера 1911 г. (Burmester, 1913) масштаба 1:20000 — на высоте 2220 м. Сохранились фотографии конечного положения ледника (рис. 3) в конце XIX и начале XX вв., на которых видно, что фронт ледника в это время был крутым, что свидетельствует о его наступании, и он располагался вблизи границы незадернованной части зандра, которая обрамлена несколькими моренными валами (см. рис. 1, в), за которыми начинается

густой лес. Несмотря на низкую точность привязки старых карт можно утверждать, что ледник в 1911 г. был длиннее, чем в 1887 г., что согласуется с историческими описаниями (см. выше).

Орешникова (1936) отмечает, что между 1887 и 1933 гг. ледник отступил «незначительно». Темпы и характер отступления ледника в 1920–50-х годах в подробностях описаны в работе Ковалева (1961). Ссылаясь на данные С.П. Соловьева, Я.И. Фролова и М.А. Демченко, он утверждает, что с 1925 по 1931 г. ледник отступал со скоростью 3–6 м в год, с 1931 по 1932 г. — по 2 м в год. С 1940 по 1947 г. ледник отступил на 49 м. Примечательно, что такое медленное отступление продолжалось до 1950-х годов. В 1959 г. была составлена карта ледника в масштабе 1:10 000 (Никулин, Трошкина, 1974). Высота конца ледника на ней — 2232 м, линейное сокращение, по сравнению с 1911 г., — всего 200 м. После 1950-х годов скорость отступления немного увеличилась. Судя по карте того же масштаба, в 1979 г. конец ледника Шхельда находился на высоте 2270 м, линейное отступление за 20 лет, таким образом, в среднем составило около 530 м (Сейнова, Золотарев, 2001).

По данным Панова с 1959 по 1965 г. ледник отступил на 84 м, с 1985 по 2007 г. — на 180 м (Панов, 1993). Судя по изображению на космических снимках, конец ледника Шхельда в 2014 г. находился на высоте 2275 м и отступил от положения 1980 г. на 590 м (см. рис. 4; табл. 3). В табл. 3 указаны масштабы линейного отступления ледника, определенные по картографическим и дистанционным данным.

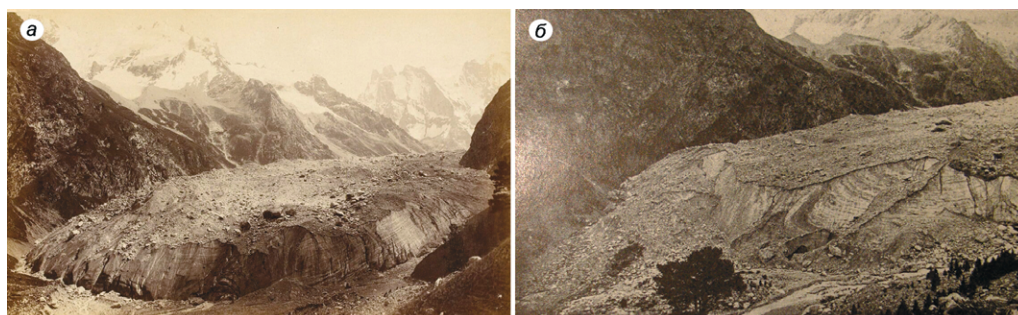


Рис. 3. Старые фотографии ледника Шхельда. *а* — фотография М. фон Деши, июль 1886, *б* — фотография Г. Бурместера (1913), 1911

Fig. 3. Old photos of Shkhelda Glacier. *a* — photo by M. Dechy, July, 1886; *b* — photo by H. Burmeister, (1913), 1911

Таблица 3. Отступление ледника Шхельда по данным ДЗЗ и картам

Год	Величина отступления, м	Изменение длины ледника, м
1850-е (МЗ)	0	0
1887	–309	–309
1911	+141	–168
1945	–65	–233
1957	–93	–326
1980	–760	–1086
2014	–580	–1666
2022	–550	–2216

Таким образом, судя по картографическим и историческим данным, в 1880–1920-х годах конец ледника находился примерно в одном месте, вблизи последней незадернованной морены (рис. (рис. 1, *в*), фото Джомелли). В 1920-х годах ледник начал отступать, постепенно сокращался и продолжает уменьшаться в размерах вплоть до настоящего времени.

Морены и оценки их возраста. В 2004 г. среднюю часть долины Шхельда заполнял массив мертвого льда, который в своей нижней части в 2004 г. заканчивался обрывом чистого ледникового льда (см. рис. 1, *а*). На поверхности мертвого льда слой обломочного материала разной размерности достигал нескольких метров, начинала формироваться почва, уже росли сосны и березы, которые при вытаивании льда приспосабливаются к обычным условиям (см. рис. 1, *з*) или погибают (см. рис. 1, *д*). Судя по количеству мутовок, возраст погибшей сосны, показанной на фотографии, — 18 лет. На поверхности мертвого языка уже было много лишайников *Rhizocarpon geographicum sensu lato* (см. рис. 1, *е*), что дополнительно

свидетельствует об отсутствии активного движения льда, так как лишайники предпочитают стабильную поверхность. Размер некоторых лишайников в 2004 г. достигал 33 мм. Во время нашего посещения долины летом 2023 г. лёд существенно стаял и уже не выглядел как настоящий язык ледника (см. рис. 1, *б*).

На обширном зандре между концом ледника и моренным комплексом, замыкающим незадернованную часть зандра М1 (см. рис. 1), в 2004 г. мы отобрали несколько образцов старых сосен; самое старое дерево поселилась здесь в 1960-х годах (см. табл. 2).

Моренный вал М1 обрамляет незадернованную часть зандра. Высота вала, сложенного серыми гранитами, достигает 10 м. В его состав включены огромные, плохо окатанные валуны. На одном из них в 2004 г. была обнаружена метка белой краской: «конец языка ледника 1928 г. ИГ». На валу растут сосны, пять из них были выбраны для дендрохронологического датирования (см. табл. 2). Возраст самой старой из них — 1966 год. Прибавив 15 лет на время колонизации и поправку в 10–15 лет на высоту бурения, получаем минимальный возраст морены — 1930-е годы, что близко к указанному на валуне. По данным Г. Бурместера, в 1911 г. конец ледника находился на высоте 2220 м, т.е. примерно там, где находятся моренные валы на правом и левом бортах долины (см. рис. 4), здесь заканчивается незадернованная часть зандра и начинается густой молодой сосновый лес. К сожалению, в 2023 г. нам не удалось обнаружить этот камень с меткой и отразить его положение на карте.

За этой незадернованной мореной, в лесу, на дне долины, по обеим берегам реки расположен конечно-моренный комплекс, в котором читаются следы четырёх стадий наступания ледника (М2–М5; см. рис. 4), однако следы отдельных стадий наступания ледника выражены в нем нечетко и ясных границ между валами зачастую не видно. Две самые древние М4 и М5 представляют собой нагромождения огромных неокатанных и слабо

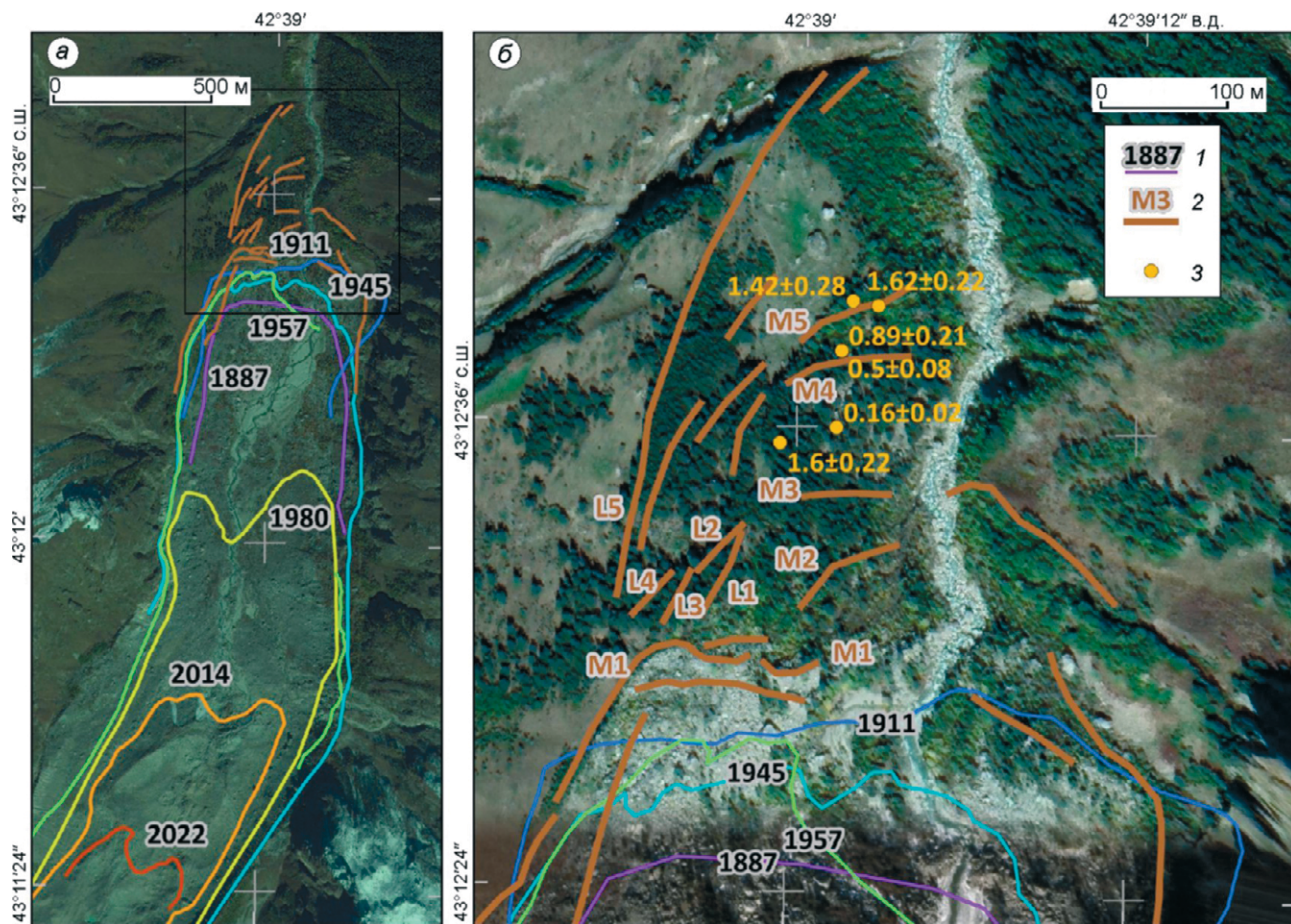


Рис. 4. Положение конца ледника Шхельда по данным дистанционного зондирования и картам. Возраст морен по космогенным изотопам и минимальный возраст морен и участков зандра по дендрохронологическим данным: *а* – обзорный вид, *б* – увеличенный фрагмент.

1 – положение ледника в разные годы, *2* – расположение морен и их названия, *3* – место отбора образцов и результаты датирования по космогенным изотопам

Fig. 4. Terminus position of the Shkhelda Glacier according to remote sensing data and maps: *a* – overview, *б* – enlarged part. *1* – position of the glacier in different years, *2* – location of moraines and their names, *3* – sampling location and results of cosmogenic isotope dating

окатанных валунов, на которых растут сосны. Вал M2 имеет более ясно очерченные контуры и более классический облик, характерный для конечной морены.

Интересно, что на дне долины деревьев старше полутора столетий мы не обнаружили (см. табл. 2). На моренах M2, M3 и M4 возраст самых старых деревьев – 1916, 1890 и 1874 годы, соответственно. Значит, с поправками на время заселения и на высоту бурения, минимальный возраст валов – вторая половина XIX века. Как будет показано ниже, для морены M4 это не так, и ее минимальный возраст существенно отличается от истинного.

На левом борту долины читается несколько ярусов береговых морен. Два верхних яруса прослеживаются вдоль борта, но соответствующие им части конечных морен размыты и в рельефе не

выражены. Судя по конфигурации этих береговых морен, их конечно-моренные комплексы должны были располагаться на высоте примерно 2140 и 2133 м, ниже морены M5. Эти стадии выделены на схеме (Baume, Marcinek, 1998) и условно отнесены там к «исторической» стадии и к наступаниям «XIV–XVII вв.», хотя и не датированы. Третья морена, более молодая, на схеме Бауме и Марсинека (Baume, Marcinek, 1998) обозначена как морена середины XIX в. По-видимому, она примерно соответствует нашей морене M3.

Между моренами M2 и M3 на склоне выделяется несколько фрагментов более молодых береговых морен, расположенных компактно и покрытых лесом. Поскольку эти фрагменты морен непосредственно между собой не соединяются, не исключено, что некоторые из них сформировались во

время одного или нескольких близких по времени наступаний. На береговых моренах старый лес сохранился несколько лучше, чем на дне долины, где его мог уничтожить и обвал, описанный Динником (см. выше) и вырубки. Хотя точно датировать береговые морены с помощью дендрохронологии невозможно, но примерное время относительно недавних наступаний, сформировавших эти уровни, оценить все же реально. Самое старое дерево на нижнем ярусе береговой морены L1 по возрасту относится к 1916 г. (см. табл. 2). На втором ярусе (L2) самая старая сосна имеет возраст 1914 г., на третьем — L3 — 1880 г., на четвертом — L4 — также 1880 г. На морене L5 — самой высокой и, следовательно, более древней морене, — три дерева старше — 1865, 1823 и 1820 гг. Выше этой морены, на склоне, возраст деревьев опять уменьшается (1850 г.). Таким образом, учитывая поправки на время поселения и высоту бурения (в сумме около 20–30 лет), можно предполагать, что в середине — второй половине XIX в. было несколько наступаний ледника последовательно меньшего масштаба (морены L1 — L4). Минимальный дендрохронологический возраст самой высокой морены L5 — конец XVIII в. (1820 г. — самое старое дерево) нереалистичен, поскольку эта морена выклинивается ниже конечной морены M5, которая, как будет показано ниже, датируется по космогенным данным временем примерно 1.4–1.6 тыс. л.н.

Наши попытки датировать морены, дендрохронологическим методом в долине ледника Шхельда показывают, что в данном случае возможности метода довольно ограничены. Тем более важно было получить первые результаты датирования морен по космогенным изотопам (см. табл. 1; рис. 4).

К сожалению, эти датировки единичны и они дают представление о хронологии ледниковых событий лишь в самом первом приближении. Результаты датирования показаны в табл. 1. Выбор валунов для датирования по космогенным изотопам, проведенного группой В. Джомелли с коллегами в 2016 г., был затруднен тем, что, как уже отмечалось выше, рельеф дна долины Шхельды существенно изменен, по-видимому, в связи с обвалом 1863 г. Таким образом, различить отложения обвального и ледникового генезиса очень сложно.

Самая молодая дата для одного из валунов, полученная в долине Шхельды, — 0.16 ± 0.02 тыс. л.н., расположена несколько ниже морены M3, минимальный возраст которой, по дендрохронологическим данным, относится примерно к 1860-м годам (1890 г. минус 30 лет на поправку). Четыре уровня нижних береговых морен выклиниваются примерно в районе конечной морены M3. По дендрохронологическим данным они датируются XIX в., что соответствует датировке конечной морены. Таким образом, можно утверждать, что в XIX в. ледник испытывал минимум четыре стадии наступания, а его

язык располагался не ниже морены M4 на высоте 2180 м.

Непосредственно за мореной M4 два валуна показали существенно более древние космогенные даты 0.5 ± 0.08 и 0.89 ± 0.21 тыс. л.н. Валуну расположены в нескольких метрах друг от друга, но их даты не перекрываются. Хотя эти датировки и не дают точной оценки времени формирования морены M4, они все же указывают на то, что эти отложения формировались ранее пика наступаний ледников малого ледникового периода в середине XIX в. и, вероятно, имеют возраст 500–900 лет. Возможно, они относятся к двум разновременным наступаниям ледника примерно одинакового масштаба, что вполне характерно для кавказских ледников (Solomina et al., 2024). Как единичные и не имеющие подкрепления другими методами эти датировки можно было бы игнорировать, если бы похожие даты не были бы получены для других ледников региона (см. Дискуссию).

Две даты для самой древней из сохранившихся конечных морен M5 — 1.42 ± 0.28 и 1.62 ± 0.22 тыс. л.н. перекрываются с учетом доверительных интервалов и дают более надежное представление об обособленной подвижке ледника. Третья дата, которая также относится к этому временному интервалу, — 1.6 ± 0.22 тыс. л.н., по всей вероятности, имеет неверные координаты, и, хотя и совпадает с датами, приведенными выше, трудно объяснима с точки зрения расположения этого валуна на поверхности, которая, по комплексу признаков, датируется XIX в.

Ледник продвигался и ниже морены M5 по долине, о чем свидетельствуют описанные выше береговые морены. Возвращаясь к вопросу о времени формирования верхней береговой морены L5, минимальный возраст которой по дендрохронологии определен как конец XVIII в., и опираясь на оценки возраста конечной морены M5, можно заключить, что морена L5 существенно старше малого ледникового периода и даже позднеантичного похолодания (Buentgen et al., 2016).

ДИСКУССИЯ

Одним из важных дискуссионных методических вопросов является комплекс проблем, связанный с определением границы между мёртвым льдом и собственно ледником. Для такого необычного, покрытого толстым слоем поверхностной морены, ледника, как Шхельда, эта проблема стоит особенно остро. Сопоставляя аэрофото- и космические снимки, мы оценивали перемещение характерных глыб на поверхности ледника, чтобы понять, является ли рассматриваемый участок отделившимся от ледника или его языком, покрытым поверхностной мореной. Так, на аэрофотоснимке 1945 г. видно несколько близко расположенных валунов, на

изображении 1957 г. они сместились в северо-восточном направлении на 100 м, а к 1980 г. их смещение составило еще 50 м. Эти наблюдения подтверждают, что в 1957 г. валуны располагались на подвижной части языка ледника. Это позволило нам с большей уверенностью провести границу языка.

Для определения границ ледника в последние годы мы также использовали радарные снимки, полученные с космического аппарата Sentinel-1A. Мы брали пары снимков, полученных в интерферометрическом режиме, и вычисляли когерентность между ними. Этот параметр показывает, происходили ли изменения на поверхности за время между снимками. Граница ледника, оцифрованная по оптическому космическому снимку 2014 г. и выделенная по когерентности снимков 2015 г., практически полностью совпадают, что подтверждает правильность определения границы ледника. Для 2022 г. ситуация менее очевидная, так как перед оцифрованной границей встречаются фрагменты с низкой когерентностью, что говорит об изменении поверхности. Такие изменения могут быть вызваны смещениями грунтов, оползнями, таянием льда. Так как перед выделенной по оптическому снимку границей ледника местá с низкой когерентностью фрагментарны, скорее всего они не относятся к леднику. Несмотря на использование комплекса данных, мы допускаем возможность ошибок и неточностей в определении положения конца этого ледника, покрытого плотным слоем морены, которая трудно отличима от отложенной основной морены, обрамляющей язык. Величины отступления конца ледника приведены в табл. 3. На рис. 5 для сравнения приведены величины отступления ледника по инструментальным и историческим данным. Наши оценки для величин отступления конца ледника хорошо согласуются с данными

Ковалева (1961) и Панова (2008) (рис. 5), но они непосредственно привязаны в пространстве, чем отличаются от предшествующих реконструкций. Нам также удалось продлить ряд с помощью космических снимков до 2022 г.

Возможность использования лихенометрии на предполях ледника Шхельда требует дополнительных комментариев. Поскольку поверхность языка Шхельды покрыта слоем поверхностной морены и уже на леднике поселяются корковые лишайники, которые, видимо, сохраняются и на отложенных моренах, лихенометрическое датирование конечных морен здесь проблематично. Однако некоторые наблюдения кажутся нам любопытными. Так, на отложениях, которые сформировались около 100 лет назад (с маркой 1928 г.), размер лишайников составлял 31 мм (измерения 2004 г.) и почти такой же размер лишайники имели на поверхности мертвого льда. По кривой роста (Solomina et al., 2016), это соответствует примерно 120 годам. Морена, которая помечена на местности 1928 годом, судя по карте военных топографов 1887 г. и карте Бурместера 1911 г., находится примерно там же, где ледник был в конце XIX — начале XX вв. Видимо, материал в ней перемешан. Интересно, что время экспонирования этой поверхности по данным лихенометрии согласуется с картографическими и историческими данными. Более того, размер лишайников на поверхности мертвых льдов составляет примерно такую же величину. Если придерживаться теории об обвальном происхождении поверхностной морены ледника, размер лишайников на этом участке не противоречит датировке обвала (1863 г.). По нашей кривой он должен быть чуть больше (около 35 мм), но несколько занижен, возможно, из-за нестабильности поверхности.

В этой работе мы выделили шесть фрагментов береговых морен, четыре из которых мы датировали по дендрохронологическим данным. Примерная оценка их возраста — середина — вторая половина XIX в. — в целом хорошо согласуются с данными по другим ледникам (см., например, Solomina et al., 2016; Solomina et al., 2024) и с историческими свидетельствами первых путешественников. Показательно, что морены L1 — L4 (середина, вторая половина XIX в.), находятся примерно на уровне конечной морены M3, для которой получена ^{10}Be дата 0.16 ± 0.02 тыс. л.н. (максимальный возраст, так как морена находится чуть выше по долине). Таким образом несмотря на то, что одной даты для окончательного суждения о возрасте морены M3 явно недостаточно, дендрохронологические данные поддерживают эту датировку. Положение морены M3 относительно современного конца ледника (на расстоянии 2325 м по горизонтали и 250 м по высоте) также не противоречит нашим представлениям о динамике ледников Кавказа в малый ледниковый период. Интересно, что на леднике Кашкаташ,

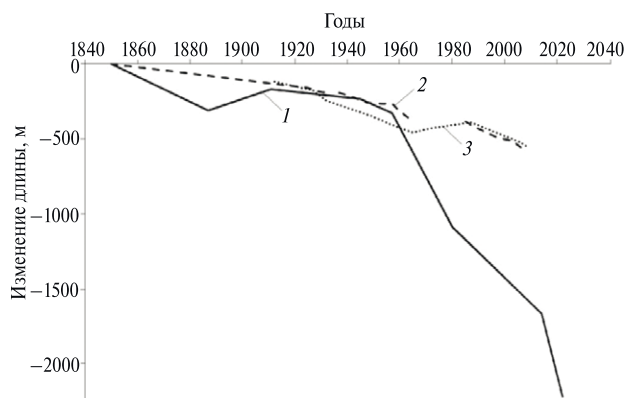


Рис. 5. Изменение длины ледника Шхельда по нашим данным (1), Панова и соавторов (2008) (2) и ледника Кашкаташ по нашим данным (3)

Fig. 5. Change in the length of the Shkhelda Glacier according to our data (1), Panov et al. (2008) (2) and Kashkatash Glacier according to our data (3)

расположенном неподалеку от Шхельды, по космогенным данным также датируется наступание 0.16 ± 0.02 тыс. л.н., которое подтверждается данными дендрохронологии: там на морене обнаружено дерево, поврежденное в результате наступания ледника (Solomina et al., 2024).

Минимальный дендрохронологический возраст морен L1 и L2 (конец XIX в.) занижен, так как положение конца ледника в 1880-х годах известно по карте военных топографов: в это время ледник оканчивался на несколько сот метров выше. Возможно, морены L1 и L2 образовались во время одного из более ранних наступаний или периодов стационарного состояния ледника второй половины XIX в. На леднике Большой Азау, например, наступания, по историческим данным, отмечались в 1840-х, 1876, 1884 и 1890-х годах (Володичева, Войтковский, 2004). Минимальный возраст береговых морен L3 и L4 с одинаковыми дендрохронологическими датировками (1880 г.) с учетом поправок — 1850-е годы или несколько ранее. В это время, по разным данным, на Кавказе многие ледники наступали и, более того, формировали мощные морены (Володичева, Войтковский, 2004; Solomina et al., 2016; Tielidze et al., 2020; Solomina et al., 2024). Середина XIX в. — время последнего максимума наступания ледников в малый ледниковый период во многих горных странах (Solomina et al., 2015).

Возраст отложений, которые примыкают к комплексу XIX в., определен в значительной степени условно. Здесь для двух валунов, расположенных неподалеку друг от друга, получены ^{10}Be даты 0.5 ± 0.08 и 0.89 ± 0.21 тыс. л.н., которые можно трактовать и как следы двух отдельных наступаний, и как две даты для одной морены с большим разбросом значений возраста. Морфологически эти отложения не различаются: они не формируют ясно выраженные отдельные генерации, а представлены массивом валунов, среди которых встречаются гигантские. Возможно, что дата 0.5 ± 0.08 тыс. л.н. синхронна бериллиевой датировке ясно выраженной левой береговой морены ледника Кашкаташ (0.53 ± 0.13 тыс. л.н.), тоже единичной, т.е. отложение обеих морен сформировались в XV в. н.э.

Для второй даты — 0.89 ± 0.22 тыс. л.н. также есть аналоги в моренных комплексах других ледников: Кашкаташ (0.82 ± 0.18 , 0.72 ± 0.11 , 0.70 ± 0.11 тыс. л.н.), Донгуз-Орун (0.77 ± 0.1 тыс. л.н.) в Приэльбрусье (Solomina et al., 2024) и Чалаати (0.79 ± 0.08 , 0.67 ± 0.10 тыс. л.н.) на южном макросклоне Кавказа, в Грузии (Tielidze et al., 2020). Эти наступания относятся к так называемой первой фазе активизации ледников малого ледникового периода. Их размах несколько превосходит пик наступаний в XIX в., но в целом имеет примерно ту же амплитуду, поэтому на некоторых ледниках он не выражен, поскольку эта морена перекрыта более поздними

отложениями второго ледникового максимума малого ледникового периода.

Последняя из датированных конечных морен имеет две перекрывающиеся космогенные даты 1.42 ± 0.28 , 1.62 ± 0.22 тыс. л.н. Третья дата 1.6 ± 0.22 тыс. л.н. в том же временном диапазоне получена для валуна, который расположен несколько выше по долине, ближе к ее борту. Возможно, он переместился с береговой морены той же стадии, что и описанная конечная морена M5, но в отношении этой даты остается неопределенность в интерпретации. В настоящее время мы склонны отбросить эту дату. В период 1.7–1.6 тыс. л.н. сформировались морены на леднике Ирик (Solomina et al., 2024), которые, скорее всего, синхронны этому наступанию на леднике Шхельда. Примерно в этот период отложения небольшого пересыхающего озера Гарабаши в период 1.5–1.7 тыс. л.н. имеют ненарушенную стратификацию, возможно, годовую. Она указывает на то, что в это время озеро не пересыхало и первоначальное залегание слоев не нарушалось, т.е. был влажный и прохладный климат. Похолодание, которое получило название «позднеантичный малый ледниковый период», подробно описано в статье Бюнтгена с соавторами (Büntgen et al., 2016) и отнесено ими к VI–VII вв. н.э. Учитывая неточность космогенных датировок, не исключено, что морена ледника Шхельда образовалась 1.4–1.6 тыс. л.н. в результате наступания ледника, связанного с этим похолоданием.

В целом на Кавказе геохронологический контекст, в который можно было бы вписать наши единичные пока датировки морен ледника Шхельда, еще очень невелик. Отметим здесь реконструкцию колебаний ледника Большой Азау, основанную на радиоуглеродном датировании палеопочв, погребенных между моренными горизонтами. Наступания ледника максимальной амплитуды, которые приводили к перекрытию льдом левой береговой морены ледника, по этим данным, относятся к XIX, XV–XVII, VII–XIX вв. и 3–3.2 тыс. л.н. (Solomina et al., 2022). Наши датировки наступаний ледника XIX, XV и, возможно, V–VII вв. в целом согласуются с этими данными. Одна из двух недатированных морен, замыкающих позднеголоценовый комплекс, может соотноситься с наступанием 3–3.2 тыс. л.н., маркированным нижним моренным горизонтом в разрезе береговых морен Большого Азау. Интересно, что наши первые датировки по космогенным изотопам в целом согласуются со схемой Vaume, Marcinek (1998), основанной на косвенных данных и аналогиях с другими горными странами, согласно которой на предполях ледника Шхельда выделялись морены XIX, XIV–XVII вв. и «исторической стадии», которая на Кавказе традиционно относится к началу I тыс. н.э.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описаны первые рекогносцировочные результаты космогенного датирования морен в долине ледника Шхельда. Предполагалось, что после получения первых датировок эти исследования будут продолжены, однако поскольку перспектива дальнейших работ по датированию пока не просматривается, мы решили обнародовать эти предварительные результаты. В целом они показывают удачную комбинацию дендрохронологических и космогенных датировок для молодых морен, а также совпадение, вероятно, неслучайное, датировок более древних позднеголоценовых морен у нескольких ледников, причем как расположенных по соседству (Шхельда — Кашкаташ), так и более удаленных (Шхельда — Ирик, Донгуз-Орун, Большой Азау) и даже находящихся на разных макросклонах Кавказа (Шхельда — Чалаати).

Ледник Шхельда, обладающий весьма специфическими особенностями, поскольку его поверхность забронирована мореной, отличался своеобразной динамикой в конце XIX—начале XX вв., т.е. наступал, когда другие ледники Кавказа отступали. Привязка старых карт позволила установить его границы в это время. В 1920-х годах ледник начал медленно отступать, но в XXI в. скорость его отступления существенно увеличилась; заметно деградировал и язык мертвого льда, который заканчивался обнажением чистого льда — «улыбка Шхельды». Космогенные и дендрохронологические датировки позднеголоценовых морен, хоть и совершенно предварительные, указывают на возможные наступания ледника в конце и середине XIX в., 500–800 л.н. (возможно два наступания), 1.4–1.6 тыс. л.н. Интересно, что эти наступания характерны и для обычных, незабронированных мореной ледников Кавказа и, вероятно, вызваны сходными изменениями климата. Хочется надеяться, что эти исследования будут продолжены и добавят определенности изложенным здесь результатам.

Благодарности. Мы благодарны А.Д. Алейникову за ценные консультации, нашим французским коллегам из Университета Экс-Марсель, CNRS, за внедрение метода космогенного датирования на Кавказе, а также за их усилия по отбору и обработке образцов в лаборатории. В.Н. Михаленко, И. Павловой и М.Ю. Александрина за участие в полевых работах и помощи в отборе образцов. Е.А. Долгова оказала большую помощь в датировании древесных колец; М.А. Лукьянчева приняла участие в обработке образцов; Р.Н. Курбанов оказал большую помощь в организации лабораторных исследований. Исследование выполнено при поддержке гранта Минобрнауки РФ (Соглашение № 075-15-2024-554 от 24.04.2024).

Acknowledgements. We are grateful to A. Aleinikov for valuable consultations, to our French colleagues of the Aix-Marseille University, CNRS, for the introduction of this method in Caucasus as well as for their continuous efforts in sampling and processing the samples in the lab. V. Mikhaleenko, I. Pavlova and M. Aleksandrino took part to the field campaigns and the data sampling. E. Dolgova was very helpful in tree-ring dating. M. Lukyanicheva took part to the sample preparation, R. Kurbanov was very helpful in the logistic of laboratory experiments. The studies were supported by grant of the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation (agreement № 075-15-2024-554 of 24.04.2024).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Альтберг В.Я.* О состоянии ледников Эльбруса и Главного Кавказского хребта в бассейне реки Баксан в период 1925–1927 гг. // Известия Гос. гидрологического института. 1928. Т. 22. С. 79–89.
- Буш Н.А.* О состоянии ледников северного склона Кавказа в 1907, 1909, 1911 и 1913 годах // Известия Императорского Русского географического общества по общей географии. 1914. Т. L. Вып. V и IX. С. 461–510.
- Володичева Н.А., Войтковский К.Ф.* Эволюция ледниковой системы Эльбруса. // География, общество, окружающая среда. Структура, динамика и эволюция природных геосистем. Под. ред. В.И. Конищева и Г.А. Сафьянова. М.: Издат. дом. «Городец», 2004. Т. I. С. 44–50.
- Демченко М.А.* Ледник Шхельды // Тр. географического фак-та ХГУ. 1952. Т.1.
- Динник Н.Я.* Горы и ущелья Терской области // Записки КОРГО. 1884. Т. XIII. Вып. 1. С. 1–48.
- Карта военных топографов. 1:42 000. 1887. Управление военных топографов. Ростов-на-Дону: 4-я картографическая фабрика Геокартпром.
- Ковалев П.В.* Современное оледенение бассейна реки Баксана // Материалы Кавказской экспедиции по программе МГГ. Т. 2. Харьков: Изд-во ХГУ, 1961. С. 3–106.
- Мушкетов И.В.* Исследование ледников России в 1897 г. // Изв. Русского географического общества. 1899. Т. 35. Вып. 2. С. 228–230.
- Орешникова Е.И.* Ледники Эльбурского района по исследованиям 1932–33 гг. // Кавказ: Тр. ледниковых экспедиций. 1936. Вып. 5. С. 239–297.
- Никулин Ф.В., Трошкина Е.С.* Эволюция ледников Центрального Кавказа (на примере ледников Адыр-Су и Шхельды) // Тр. Зак НИГМИ. 1974. Вып. 58 (64). С. 74–81.
- Панов В.Д., Ильичев Ю.Г., Салпагаров А.Д.* Колебания ледников Северного Кавказа за XIX–XX столетия. Пятигорск: Северокавказское изд-во МИЛ, 2008. 330 с.

- Сейнова И.Б., Золотарев Е.А. Ледники и сели Приэль-брусся (Эволюция оледенения и селевой активности). М.: Научный мир, 2001. 203 с.
- Arnold M., Merchel S., Bourlès D.L., Braucher R., Benedetti L., Finkel R.C., Aumaître G., Gottsdang A., Klein M. The French accelerator mass spectrometry facility ASTER: improved performance and developments Nuclear Instrumentation Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2010. № 268. 1954–1959.
- Balco G., Stone J.O., Lifton N.A., Dunai T.J. A complete and easily accessible means of calculating surface exposure ages or erosion rates from ^{10}Be and ^{26}Al measurements // Quat. Geochronol. 2008. № 3. P. 174–195.
- Balco G. Contributions and unrealized potential contributions of cosmogenic-nuclide exposure dating to glacier chronology, 1990–2010 // Quaternary Science Reviews. 2011. № 30. P. 3–27.
- Baume O., Marcinek J. Gletscher und Landschaften des Elbrusgebietes. Die Lawienentätigkeit. Verlag Gotha, Gotha. 1998. [In German].
- Borchers B., Marrero S., Balco G., Caffee M., Goehring B., Lifton N., Nishiizumi K., Phillips F., Schaefer J., Stone J. Geological calibration of spallation production rates in the CRONUS-Earth project // Quaternary Geochronology. 2016. № 31. P. 188–198.
- Braucher R., Guillou V., Bourlès D.L., Arnold M., Aumaître G., Keddadouche K., Nottoli E. Preparation of Aster in-house $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ standard solutions // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2015. № 361. P. 335–340.
- Büntgen U., Myglan V.S., Ljungqvist F.C., McCormick M., Di Cosmo N., Sigl M., Jungclauss J., Wagner S., Krusic P.J., Esper J., Kaplan J.O., De Vries M.A.C., Luterbacher J., Wacker L., Tegel W., Kirdyanov A.V. Cooling and societal change during the Late Antique Little Ice Age from 536 to around 660 AD // Nature Geoscience. 2016. № 9 (3). P. 231–236.
- Burmester H. Rezent-glaziale Untersuchungen und photogrammetrische Aufnahmen im Baksanquellgebiet (Kaukasus) // Zeitschrift für Gletscherkunde. 1913. № 8. Ht. 1. P. 1–41 [In German].
- Chmeleff J., von Blanckenburg F., Kossert K., Jakob D. Determination of the ^{10}Be half-life by multicollector ICP-MS and liquid scintillation counting // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 2010. Sect. B 268 (2). P. 192–199.
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2009.09.012>
- Innes J.L. Lichenometry // Progress in Physical Geography. 1985. V. 9. № (2). P. 187–254.
- Korschinek G., Bergmaier A., Faestermann T., Gerstmann U.C., Knie K., Rugel G., Wallner A. A new value for the half-life of ^{10}Be by heavy-ion elastic recoil detection and liquid scintillation counting. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2010. № 268 (2). P. 187–191.
- Lifton N., Sato T., Dunai T.J. Scaling in situ cosmogenic nuclide production rates using analytical approximations to atmospheric cosmic-ray fluxes // Earth Planet. Sci. Lett. 2014. № 386. P. 149–160.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.10.052>
- Martin L.C.P., Blard P.-H., Balco G., Lavé J., Delunel R., Lifton N., Laurent V. The CREP program and the ICE-D production rate calibration database: A fully parameterizable and updated online tool to compute cosmic-ray exposure ages // Quaternary geochronology. 2017. № 38. P. 25–49.
- Merchel S., Arnold M., Aumaître G., Benedetti L., Bourlès D.L., Braucher R., Alfimov V., Freeman S.P.H.T., Steier P., Wallner A. Towards more precise ^{10}Be and ^{36}Cl data from measurements at the 10–14 level: Influence of sample preparation. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2008. № 266 (22). P. 4921–4926.
- Osborn G., McCarthy D., LaBrie A., Burke R. Lichenometric dating: science or pseudo-science? // Quaternary Research. 2015. № 83 (1). P. 1–12.
- Solomina O., Bradley R., Hodgson D., Ivy-Ochs S., Jomelli V., Mackintosh A., Nesje A., Owen L., Wanner H., Wiles G., Young N. Holocene glacier fluctuations // Quaternary Science Reviews. 2015. № 111 (1). P. 9–34.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.11.018>
- Solomina O.N., Bushueva I.S., Dolgova E.A., Jomelli V., Alexandrin M.J., Mikhalev V.N., Matskovsky V.V. Glacier variations in the Northern Caucasus compared to climatic reconstructions over the past millennium // Glob. Planet. change. 2016. № 140. P. 28–58.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.02.008>
- Solomina O.N., Alexandrovskiy A.L., Zazovskaya E.P., Konstantinov E.A., Shishkov V.A., Kuderina T.M., Bushueva I.S. Late-Holocene advances of the Greater Azau Glacier (Elbrus area, Northern Caucasus) revealed by ^{14}C dating of paleosols // The Holocene. 2022. № 32 (5). P. 468–481.
- Solomina O.N., Jomelli V., Bushueva I.S. Chapter 19 – Holocene glacier variations in the Northern Caucasus, Russia. European Glacial Landscapes. Elsevier. 2024. P. 353–365.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99712-6.00005-2>
- Tielidze L.G., Solomina O.N., Jomelli V., Dolgova E.A., Bushueva I.S., Mikhalev V.N., Braucher R., ASTER Team. Change of Chalaati Glacier (Georgian Caucasus) since the Little Ice Age based on dendrochronological and Beryllium-10 data // Ice and Snow. 2020. 60. № 3. P. 453–470.
<http://dx.doi.org/10.31857/S2076673420030052>
- Uppala S.M., Kållberg P.W., Simmons A.J., Andrae U., Da Costa Bechtold V., Fiorino M., Gibson J.K. The ERA-40 re-analysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography. 2005. № 131 (612). P. 2961–3012.

Citation: Solomina O. N., Bushueva, I. S., Jomelli V. Late Holocene history of the Shkhelda Glacier, Northern Caucasus, according to remote sensing, dendrochronology and cosmogenic (^{10}Be) dating of moraines. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2024, 64 (4): 628–642. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673424040123

Late Holocene history of the Shkhelda Glacier, Northern Caucasus, according to remote sensing, dendrochronology and cosmogenic (^{10}Be) dating of moraines

O. N. Solomina^{1,2}, I. S. Bushueva^{1,#}, V. Jomelli³

¹*Institute of Geography Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;*

²*HSE University, Moscow, Russia;*

³*Aix-Marseille University, Marseille, France*

[#]*e-mail: irinasbushueva@gmail.com*

Received September 9, 2024 / Revised September 13, 2024 / Accepted October 7, 2024

The position of the Shkhelda valley glacier front (Elbrus region, 43.18N, 42.64 E) for the period from the 1880s to 2022 was reconstructed based on interpretation of aerial and satellite images and old maps. For the first time, the age of the Late Holocene moraines was determined using cosmogenic isotopes (^{10}Be) and the results of dendrochronological dating. Judging from historical and cartographic data, the Shkhelda Glacier was advancing in the 1880–1910, when most glaciers in the region gradually decreased in size after reaching their maximum during the Little Ice Age. In the 1880–1920, the front of the glacier was located at an altitude of about 2207 m asl. In the 1920s, the glacier began to retreat, and by 2022 had shrunk by 1.9 km; the altitude of its terminus was 2430 m asl. Left lateral moraines of the glacier, overgrown with pine forest, is indicative of 4 stages of its advance (or stationary positions), which, according to dendrochronological data, are dated to the middle and second half of the XIX century. The terminal moraine corresponding to these stages is dated by ^{10}Be to 0.16 ± 0.02 ka. Similar date (0.16 ± 0.02 ka) was previously determined for the neighboring Kashkatash Glacier. Two older moraines at the Shkhelda Glacier with the cosmogenic dates of 0.5 ± 0.08 ka and 0.89 ± 0.22 ka apparently had been formed synchronously with the moraines of the Kashkatash Glacier (cosmogenic dates of 0.5 and 0.7–0.8 ka). Evidences of the glacier advance occurred in about 0.7–0.8 ka were also revealed for the glaciers Donguz-Orun and Chalaati. The older (outer) moraine of the Shkhelda Glacier was formed 1.4–1.6 ka, i.e. approximately simultaneously with the moraine of the Irik Glacier, dated earlier by the same method of the cosmogenic isotope analysis. All cosmogenic isotope dates, determined for the forefield of the Shkhelda Glacier, need to be confirmed, as they are still single, sporadic and isolated. Despite this, they are in a good agreement with other moraine dates; the similarity of the late Holocene fluctuations of the Shkhelda Glacier with the neighboring Kashkatash Glacier is especially significant, notwithstanding the fact that the Shkhelda Glacier is covered with a dense debris cover of the supraglacial deposits, and the Kashkatash Glacier is practically free of it. The anomalous behavior (advancing) of the Shkhelda Glacier in the 1880–1910 is apparently explained by rockfall that occurred in the 1860s, which caused the glacier to be covered by debris and protected it from melting that decreased its ablation.

Keywords: glacier fluctuations, moraines, CRE dates, tree rings, Little Ice Age, Late Antique Little Ice Age

REFERENCES

- Altberg V.Ya.* On the condition of glaciers of Elbrus and the Main Caucasus Range in the Baksan River basin in the period 1925–1927. *Ottisk iz Izvestiya Gosudarstvennogo gidrologicheskogo instituta*. Reprint from Proceedings of the State Hydrological Institute. 1928, 22: 79–89. [In Russian].
- Bush N.A.* On the state of glaciers on the northern slope of the Caucasus in 1907, 1909, 1911 and 1913. *Izvestiya Imperatorskogo russkago geograficheskogo obshchestva po obshchey geografii*. Proceedings of the Imperial Russian Geographical Society on General Geography. 1914, IX: 461–510. [In Russian].
- Volodicheva N.A., Voitkovskiy K.F.* *Evolutsiya lednikovoy sistemi El'brusa*. Evolution of Elbrus glacial system. *Geografiya, obshchestvo, okruzhayushchaya sreda. Struktura, dinamika, evolutsiya prirodnih geosystem*. Geography, Society and Environment. Structure, Dynamics and Evolution of Natural Geosystems. Moscow: Gorodets, p. 44–50. [In Russian].
- Demchenko M.A.* Glacier Shkhelda. *Trudi geograficheskogo faculteta KHGU*. Proceedings of the Faculty of Geography of KHSU. 1952:1. [In Russian].

- Dinnik N.Ya.* Mountains and gorges of the Tersk region. *Zapiski KORG.O.* Notes of Caucasian branch of the Russian Geographical Society. 1884, 13 (1): 1–48. [In Russian].
- Military Topographers Map, 1887–1890. 1:42 000, Office of military topographers. Rostov on Don: 4th Cartographic Factory Geokartprom.
- Kovalev P.V.* *Sovremennoe oledenenie basseina reki Baksan.* Modern glaciation of the Baksan River basin. *Materiali kavkazskoi ekspedicii po programme MGG.* Data of Caucasian expedition by the program of International Geophysical Year. 1961, 2: 3–106. [In Russian].
- Mushketov I.V.* Investigation of glaciers in Russia in 1897. *Izvestiya Russkogo Geograficheskogo Obshchestva.* Proceedings of the Russian Geographical Society. 1899, 35 (2): 228–230. [In Russian].
- Oreshnikova E.I.* Glaciers of the Elbrus region according to the studies of 1932–33. *Kavkaz: Trudi lednikovih ekspedicii.* Caucasus: Proceedings of glacial expeditions. 1936, 5: 239–297. [In Russian].
- Nikulin F.V., Troshkina E.S.* Evolution of glaciers of the Central Caucasus (on the example of Adyr-Su and Shkhelda glaciers). *Trudi Zak NIGMI.* Proceedings of Zak Scientific and Research Hydrometeorological Institute. 1974, 58 (64): 74–81. [In Russian].
- Panov V.D., Il'ichev Yu.G., Salpagarov A.D.* *Kolebaniya lednikov Severnogo Kavkaza za XIX–XX stoletiya.* Fluctuations of glaciers of the North Caucasus for XIX–XX centuries. Pyatigorsk: North Caucasian Publishing House of the MIL, 2008: 330 p. [In Russian].
- Seinova I.B., Zolotarev E.V.* *Ledniki i seli Prielbrusiya.* Glaciers and debris flows of vicinity of the Mt. Elbrus. Moscow: Nauchniy mir, 2001: 203 p. [In Russian].
- Arnold M., Merchel S., Bourlès D.L., Braucher R., Benedetti L., Finkel R.C., Aumaître G., Gottsdang A., Klein M.* The French accelerator mass spectrometry facility ASTER: improved performance and developments Nuclear Instrumentation Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2010, 268: 1954–1959.
- Balco G., Stone J.O., Lifton N.A., Dunai T.J.* A complete and easily accessible means of calculating surface exposure ages or erosion rates from ^{10}Be and ^{26}Al measurements. *Quat. Geochronol.* 2008, 3: 174–195.
- Balco G.* Contributions and unrealized potential contributions of cosmogenic-nuclide exposure dating to glacier chronology, 1990–2010. *Quaternary Science Reviews.* 2011, 30: 3–27.
- Baume O., Marcinek J.* Gletscher und Landschaften des Elbrusgebietes. Die Lawienentätigkeit. Verlag Gotha, Gotha. 1998. [In German].
- Borchers B., Marrero S., Balco G., Caffee M., Goehring B., Lifton N., Nishiizumi K., Phillips F., Schaefer J., Stone J.* Geological calibration of spallation production rates in the CRONUS-Earth project. *Quaternary Geochronology.* 2016, 31: 188–198.
- Braucher R., Guillou V., Bourlès D.L., Arnold M., Aumaître G., Keddadouche K., Nottoli E.* Preparation of Aster in-house $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ standard solutions. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B.* 2015, 361: 335–340.
- Büntgen U., Myglan V.S., Ljungqvist F.C., McCormick M., Di Cosmo N., Sigl M., Jungclauss J., Wagner S., Krusic P.J., Esper J., Kaplan J.O., De Vaan M.A.C., Luterbacher J., Wacker L., Tegel W., Kirdyanov A.V.* Cooling and societal change during the Late Antique Little Ice Age from 536 to around 660 AD. *Nature Geoscience.* 2016, 9 (3): 231–236.
- Burmester H.* Rezent-glaziale Untersuchungen und photogrammetrische Aufnahmen im Baksanquellgebiet (Kaukasus). *Zeitschrift für Gletscherkunde.* 1913, 8: 1: 1–41.
- Chmeleff J., von Blanckenburg F., Kossert K., Jakob D.* Determination of the ^{10}Be half-life by multicollector ICP-MS and liquid scintillation counting. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* 268 (2): 192–199. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2009.09.012>
- Innes J.L.* Lichenometry. *Progress in Physical Geography.* 1985, V. 9 (2): 187–254.
- Korschinek G., Bergmaier A., Faestermann T., Gerstmann U.C., Knie K., Rugel G., Wallner A.* A new value for the half-life of ^{10}Be by heavy-ion elastic recoil detection and liquid scintillation counting." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms.* 2010, 268 (2): 187–191.
- Lifton N., Sato T., Dunai T.J.* Scaling in situ cosmogenic nuclide production rates using analytical approximations to atmospheric cosmic-ray fluxes. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2014, 386: 149–160. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.10.052>
- Martin L.C.P., Blard P.-H., Balco G., Lavé J., Delunel R., Lifton N., Laurent V.* The CREP program and the ICE-D production rate calibration database: A fully parameterizable and updated online tool to compute cosmic-ray exposure ages. *Quaternary geochronology.* 2017, 38: 25–49.
- Merchel S., Arnold M., Aumaître G., Benedetti L., Bourlès D.L., Braucher R., Alfimov V., Freeman S.P.H.T., Steier P., Wallner A.* Towards more precise ^{10}Be and ^{36}Cl data from measurements at the 10–14 level: Influence of sample preparation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms.* 2008, 266 (22): 4921–4926.
- Osborn G., McCarthy D., LaBrie A., Burke R.* Lichenometric dating: science or pseudo-science? *Quaternary Research.* 2015, 83 (1): 1–12.
- Solomina O., Bradley R., Hodgson D., Ivy-Ochs S., Jomelli V., Mackintosh A., Nesje A., Owen L., Wanner H., Wiles G., Young N.* Holocene glacier fluctuations.

- Quaternary Science Reviews. 2015, 111 (1): 9–34.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.11.018>
- Solomina O.N., Bushueva I.S., Dolgova E.A., Jomelli V., Alexandrin M.J., Mikhaleiko V.N., Matskovsky V.V.* Glacier variations in the Northern Caucasus compared to climatic reconstructions over the past millennium. *Glob. Planet change*. 2016, 140: 28–58.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.02.008>
- Solomina O.N., Alexandrovskiy A.L., Zazovskaya E.P., Konstantinov E.A., Shishkov V.A., Kuderina T.M., Bushueva I.S.* Late-Holocene advances of the Greater Azau Glacier (Elbrus area, Northern Caucasus) revealed by ¹⁴C dating of paleosols. *The Holocene*. 2022, 32 (5): 468–481.
- Solomina O.N., Jomelli V., Bushueva I.S.* Chapter 19 – Holocene glacier variations in the Northern Caucasus, Russia. *European Glacial Landscapes*. Elsevier. 2024: 353–365.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99712-6.00005-2>
- Tielidze L.G., Solomina O.N., Jomelli V., Dolgova E.A., Bushueva I.S., Mikhaleiko V.N., Brauche R., ASTER Team.* Change of Chalaati Glacier (Georgian Caucasus) since the Little Ice Age based on dendrochronological and Beryllium-10 data. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2020, 60 (3): 453–470.
<http://dx.doi.org/10.31857/S2076673420030052>
- Uppala S.M., Kållberg P.W., Simmons A.J., Andrae U., Da Costa Bechtold V., Fiorino M., Gibson J.K.* The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography*. 2005, 131 (612): 2961–3012.