

# Палеогляциология

УДК 551.324.63

doi: 10.31857/S2076673421020088

## Возраст морен ледника Большой Азау в верховьях долины реки Баксан по дендрохронологическим данным

© 2021 г. О.Н. Соломина<sup>1,2</sup>, И.С. Бушуева<sup>1\*,2</sup>, Н.А. Володичева<sup>3</sup>, Е.А. Долгова<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия; <sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия; <sup>3</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\*bushueva@igras.ru

## Age of moraines of the Bolshoy Azau Glacier in the upper course of the Baksan River valley according to dendrochronological data

O.N. Solomina<sup>1,2</sup>, I.S. Bushueva<sup>1\*,2</sup>, N.A. Volodicheva<sup>3</sup>, E.A. Dolgova<sup>1</sup><sup>1</sup>Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;<sup>2</sup>National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia; <sup>3</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

\*bushueva@igras.ru

*Received October 15, 2020 / Revised December 21, 2020 / Accepted March 19, 2021***Keywords:** *Greater Azau Glacier, Little Ice Age, tree-ring analysis, Neoglacial, glacier variations.*

### Summary

Basing on tree-ring analysis of more than 150 pines growing in the Azau clearing, the minimum age of the deposits created by the Greater Azau Glacier was identified. Historical evidence, cartographic data, remote sensing materials, as well as the results of lichenometric studies and radiocarbon dating of buried soils were used as additional sources of information. We determined limits of the area covered by the glacier tongue at the end of the 19th century. It was also shown that the highest and most pronounced lateral moraine, conventionally called the «17th century moraine», was formed earlier than the end of the 15th century. Judging from the size of the maximum lichens of *Rhizocarpon geographicum* (120–130 mm) on its surface, the age of the moraine, determined by the dendrochronological method was found to be underestimated. It may be several centuries older than the end of the 16th century. We re-examined a pine trunk buried in the sediments at the bottom of the valley which was discovered in the 1960s. Previously it was dated by radiocarbon (140±75 BP [1], the calibrated date – 1650–1960 CE). According to the new data, the most probable tree-ring dates of the buried tree are 1759–1883 CE, however, the second most likely dates are 1826–1950 CE. Unfortunately, low statistical estimates do not allow us to confirm the reliability of the dates. The paper also discusses the controversial issue of the position of the moraine of 1849 CE, which was described by H. Abich [2]. The annex to the article contains a translation of a fragment of this important paper related to the Greater Azau Glacier. Suppressions of pine growth from the moraines of the Greater Azau in the 1640s, 1710s, 1800s, 1840s, and 1860s CE are synchronous with the advances of the Bosson, Mer de Glace and Grindelwald glaciers in the Alps [3].

**Citation:** Solomina O.N., Bushueva I.S., Volodicheva N.A., Dolgova E.A. Age of moraines of the Bolshoy Azau Glacier in the upper course of the Baksan River valley according to dendrochronological data. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2021. 61 (2): 271–290 [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673421020088.

*Поступила 15 октября 2020 г. / После доработки 21 декабря 2020 г. / Принята к печати 19 марта 2021 г.*

**Ключевые слова:** *ледник Большой Азау, малый ледниковый период, дендрохронология, неогляциал, колебания ледников.*

На основе анализа дендрохронологических данных, радиоуглеродных датировок и исторических свідетельств рассмотрена история колебаний ледника Большой Азау в малый ледниковый период. Дискутируется вопрос о положении морены максимума наступания ледника в 1849 г., описанного Г. Абилом. Определён минимальный возраст морен, в том числе береговой, которую ранее относили к XVII в.

### Введение

Долинный ледник Большой Азау (координаты: 43.28° с.ш., 42.44° в.д.), расположенный в верховьях р. Баксан в Приэльбрусье, — наиболее посещаемый исследователями на Кав-

казе. Работы на леднике и его предполях ведутся с середины XIX в., особенно активно со времени основания на Поляне Азау Эльбрусской учебно-научной базы географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова в 1969 г. Описания и другую научную документацию о

леднике Большой Азау оставили И.В. Мушкетов, М. Деши, Н.Я. Динник, К.Н. Россиков, Н.В. Поггенполь, А.А. Долгушин, Н.А. Буш, В.П. Ренгартен, С.П. Соловьев, В.Я. Альтберг, Я.И. Фролов, Е.И. Орешникова, П.В. Ковалев, Г.К. Тушинский, А.В. Брюханов, И.Б. Сейнова, Е.А. Золотарев, Н.А. Володичева и многие другие исследователи [1–3]. Первые карты ледника составлены А.В. Пастуховым (1890 г.) и Г. Бурместером (1911 г.). Положение конца ледника в конце XIX – начале XX вв. было определено по историческим данным, но с некоторой долей условности, поскольку долина р. Баксан – слабонаклонная, а точность измерения положения конца ледника в те времена была невысокой.

Н.А. Володичева [4], проанализировав исторические, картографические и аналитические сведения в комплексе с данными геоморфологии, предполагает, что на дне долины можно идентифицировать морены, образовавшиеся в 1890, 1884, 1876 и 1849 гг. Морены расположены ниже скальных выступов по обоим бортам долины («ворота»), что вызывает её сужение примерно в створе нижней станции канатной дороги. В 1890–1900-х годах ледник отступал, но в 1911 г. Г. Бурместер [5] обнаружил доказательства недавнего продвижения конца ледника. В XX в. отступление ледника прерывалось наступаниями в 1930–1932 и 1972–1981 гг. В 1960-е годы ледник медленно отступал [4, 6], как и большинство ледников Центрального Кавказа. Длина ледника Большой Азау с середины XIX в. постепенно сокращается.

Помимо морен второй половины XIX – начала XX в., на предполях ледника Большой Азау выделяется высокая береговая морена (предположительно XVII в.), которая налегает на морену, условно относимую к первой фазе наступаний малого ледникового периода в XIII–XIV вв. [7]. Несмотря на высокую степень изученности колебаний ледника Большой Азау, остались и нерешённые вопросы, к которым относится определение точного времени образования моренных комплексов ледника Большой Азау. Такая информация важна как для понимания особенностей динамики ледника в прошлом, так и для оценки палеоклиматического контекста современных процессов, происходящих в Приэльбрусье и на Кавказе в целом. Цель настоящей работы – определение возраста отло-

жений в пределах моренного комплекса ледника Большой Азау по дендрохронологическим данным. Колебания ледника по инструментальным данным во второй половине XX – начале XXI в. не рассматривались, так как эти вопросы подробно изложены в многочисленных публикациях [1, 2, 7, 8].

## Материалы и методы

**Дендрохронология.** Образцы для дендрохронологического анализа на предполях ледника Большой Азау отбирались разными исследователями неоднократно. В работах В.И. Турманиной [9], J. Marcinek и др. [1] приводятся некоторые сведения о дендрохронологических исследованиях. Поскольку оригинальные дендрохронологические данные оказались нам недоступны, мы не использовали описанные возрастные датировки в настоящей работе, но привлекли их для дискуссии. Первые доступные авторам настоящей статьи образцы на дендрохронологический анализ были отобраны Г.А. Носенко и И.Ф. Хмелевским в 2002 г., но положение этих деревьев было известно приблизительно. Поскольку деревья имеют большой возраст и чрезвычайно важны для реконструкции, использовалось личное сообщение Г.А. Носенко для уточнения их примерной локализации. Все остальные образцы привязаны с точностью  $\pm 10$  м при помощи GPS и с опорой на полевые геоморфологические описания морен. На моренах ледника Большой Азау в разное время было отобрано примерно 250 кернов сосны обыкновенной (по 1–2 керна с каждого дерева), а всего обследовано около 150 деревьев. Кроме желания подробно изучить поверхность морен, необходимость в их площадном исследовании связана с активным строительством на моренах, которое уже привело и приводит к уничтожению многих старых, уникальных для исследования деревьев. Кавказские ледники редко спускаются до верхней границы леса, поэтому ледник Большой Азау вызывает у исследователей большой интерес – его язык в XIX в. вторгался в сосновый лес [2, 7]. Помимо указанных материалов, для сравнения использованы древесно-кольцевые хронологии сосны, построенные ранее для других районов Приэльбрусья [10].

Главная задача дендрохронологического анализа — определение минимального возраста поверхности морен, на которых росли деревья. Отбор и анализ образцов древесины (керны и спилы) проводили в соответствии с общепринятыми методическими требованиями древесно-кольцевого анализа [11]. Отбор вели с помощью бура Преслера, главным образом у комля, где дерево имеет наибольший набор колец. Ширину годичных колец измеряли на полуавтоматической установке LINTAB с точностью 0,01 мм и с помощью программ работы с цифровыми изображениями CDendro и CooRecorder. После этого данные по ширине годичных колец подвергали перекрёстной датировке в программе TSAP-Win с последующей проверкой в программе COFESHA [12]. Большинство деревьев — живые, поэтому сложностей с датировкой не возникало. Кроме того, удалось успешно датировать несколько сухих стволов деревьев. Так, с помощью А.Д. Олейникова был исследован ствол дерева, погребённого во флювиогляциальных отложениях на дне долины, и выполнена перекрёстная датировка с целью определения времени его жизни.

В дендрохронологии для обеспечения надёжности перекрёстного датирования отбирают по два керны с каждого дерева [11]. Поскольку для проверки качества датирования использовали древесно-кольцевые хронологии, построенные в этом районе ранее, необходимости в отборе двух образцов с каждого дерева не было. Для бурения выбирали наиболее старые деревья, так как именно они относятся к первопоселенцам, а их возраст наиболее близок ко времени стабилизации морен. По наблюдениям В.И. Турманиной, в середине XX в. [9] на Центральном Кавказе освобождённая ото льда поверхность зандра или отложённой морены начинает заселяться соснами и можжевельником, как правило, спустя 15–20 лет. По наблюдениям Н.А. Володичевой в последнее время заселение происходит быстрее. На этот показатель влияет множество локальных факторов, среди которых — геологические, минералогические, топографические, микроклиматические и др., поэтому в разных долинах время заселения древесными растениями существенно варьирует. В тех случаях, когда дендробур не достигал сердцевины ствола или проходил в стороне от неё, использовался набор прозрачных палеток, которые по кривизне по-

следних колец в образце дают представление о количестве недостающих колец. Эта поправка прибавляется к количеству колец, представленных в керне. Несмотря на то, что бурение происходит вблизи комля, расстояние до поверхности земли составляет не менее 30–50 см: таковы размеры ручки бура, которую надо поворачивать при бурении. Возраст сосен с высотой ствола 30–50 см на моренах Приэльбрусья может достигать 5–7 лет. Это означает, что при определении времени стабилизации субстрата, на котором выросло дерево, к возрасту образца следует добавить ещё и эту поправку.

Морены в верховьях долины р. Баксан, покрытые лесной растительностью, сохранились главным образом по левому борту долины. Только небольшой фрагмент соснового леса чудом уцелел на дне долины («лесной остров»), на правом берегу Баксана. Остальной лес на правом борту, частично по левому борту и вблизи русла р. Баксан уничтожен лавинами, селями и русловыми процессами. Эти нарушения растительности в долине во многом объясняют возможное занижение дендрохронологического возраста некоторых датированных поверхностей по сравнению с истинным.

**Лихенометрия.** Поскольку поверхность многих морен в долине ледника Большой Азау обновлена частыми лавинами, лихенометрический метод имеет здесь ограниченное применение. На поверхности морен, которые чётко выражены в рельефе, измеряли максимальные диаметры корковых лишайников группы *Rhizocarpon geographicum sensu lato*. Исследование проводили на всей поверхности морен, без деления на стандартные пробные площади. На больших валунах измеряли один, наиболее крупный лишайник. В качестве индикатора возраста каждой генерации морен использовали максимальный из всех замеров. Калибровку «диаметр лишайника—возраст» проводили по кривой, опубликованной в обзоре [13]. Согласно этим данным, скорость прироста лишайников в первые 100–150 лет на Центральном Кавказе составляет примерно 0,30–0,25 мм/год. В связи с отсутствием надёжных независимых датировок для поверхностей старше двухсот лет на Кавказе, здесь до сих пор нет надёжной кривой роста для более древних поверхностей, поэтому лихенометрические оценки возраста для них очень условны.

**Радиоуглеродные данные.** Использовались данные радиоуглеродного датирования, как опубликованные ранее [1, 4, 13], так и полученные в последние годы авторами настоящей работы. В частности, указано несколько радиоуглеродных датировок погребённых почв, обнаруженных в разное время в лавинных, селевых, склоновых и моренных отложениях. Датировки выполнены для определения общего содержания углерода в почве или углях, а положение разрезов даёт косвенную информацию о колебаниях ледника в прошлом.

**Картографические данные.** В исследовании использован космический снимок, полученный одним из космических аппаратов компании Махаг 16.10.2009 г. (скачан из системы Google Earth). Снимок применён в качестве референтного для привязки картографических материалов. Дополнительно проанализированы карты, созданные Г. Бурместером в 1911 г. (масштаб 1:20 000), В. Пастуховым в 1890 г. (масштаб 1:50 000) и военными топографами в 1889 г. (масштаб 1:42 000). Привязку данных карт выполняли по контрольным точкам рельефа. На картах А.В. Пастухова и военных топографов конец ледника выглядит одинаково, однако карты имеют разный масштаб и разграфку. Скорее всего, карта А.В. Пастухова была переиздана в советский период. В работе использованы наземные фотографии ледника конца XIX – начала XX в., сделанные М. Деши в 1884 г., В. Селла в 1889 г., А.В. Пастуховым в 1890 г. и Г. Бурместером в 1911 г., а также гравюры Г. Абиha, созданные во время посещения ледника в 1849 и 1873 г. [2]. Кроме того, применялась цифровая модель местности, построенная по стереопаре с космического аппарата Pleiades, полученная 08.09.2017 г. [14].

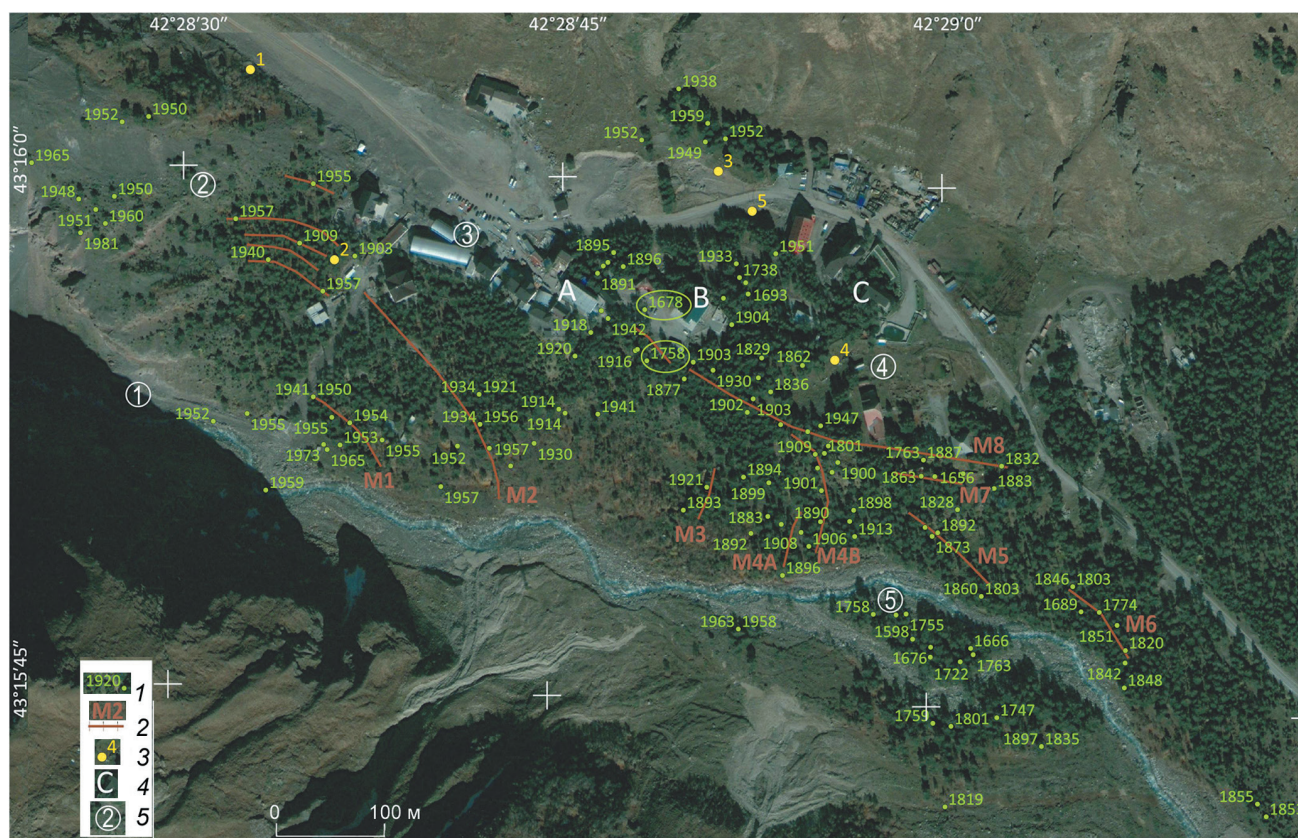
## Результаты

Результаты дендрохронологического датирования приведены на рис. 1. Цифрами на рис. 1 показан год образования первого годичного кольца у деревьев, с поправкой на число потенциально отсутствующих до центра ствола колец в тех случаях, когда бур не попал в сердцевину. Для оценки минимального возраста поверхности необходимо также ввести поправки

на время поселения деревьев (10–20 лет) и высоту бурения (5–10 лет) в случае бурения у комля и 10–20 колец, если бурение велось на уровне груди. Рассмотрим описание морен и обсудим их минимальный возраст по дендрохронологическим данным на нескольких характерных участках долины.

**Морены на лавовом потоке выше нижней станции канатной дороги.** Гряда вулканического происхождения, расположенная на левом борту долины Большого Азау, – хороший ориентир для определения размеров ледника на старых рисунках и снимках конца XIX в. Ещё совсем недавно, в конце XIX в., этот лавовый поток со стороны долины р. Баксан частично покрывался льдом, что видно, в частности, на фотографии В. Селлы 1889 г. (рис. 2, а; современная фотография – см. рис. 2, б). С этой стороны лавовый поток в настоящее время зарастает молодым сосновым лесом (время появления деревьев – 1948–1950 гг.) (см. рис. 1), в котором выделяется минимум пять валов береговых морен ледника Большой Азау, иногда прерывающихся и теряющихся на крутом склоне. В лесу встречаются огромные окатанные валуны. Эти морены описывал Н.Я. Динник [15, с. 27], посетивший ледник в 1881 г.: «...правый бок ледника прилегает к почти отвесным скалам и имеет лишь небольшие морены, левая же сторона его окаймлена целым рядом параллельных морен, достигающих шагов 100 ширины и сажень 30 высоты...». К.Н. Россиков [16] отмечает, что боковые морены на левой стороне ледника очень велики, частично они лежат на льду, частично окаймляют его в виде нескольких высоких параллельных гряд. На льду они образуют полосу шириной примерно в 100 шагов. На фотографии В. Селлы (см. рис. 2, а) все боковые морены имеют свежий облик, не задернованы, а внутренняя гряда, судя по тёмным пятнам на её поверхности, возможно, содержит вытаявающий мёртвый лёд. Сейчас (2020 г.) морены прерываются искусственным обрывом – стенкой котлована у гостиницы «Азау Стар».

Наиболее старые сосны на этих моренах появились в 1903 и 1909 гг. Учитывая поправки, минимальный возраст стабилизации этих поверхностей – 1870-е годы. По-видимому, эти морены были отложены незадолго до посещения ледника путешественниками в 1880-х годах,



**Рис. 1.** Схема предполий ледника Большой Азау.

1 – местоположение и возраст деревьев на моренах (время образования первого кольца с поправкой на недостающие кольца в центре ствола); 2 – положение и название морен; 3 – положение разрезов с радиоуглеродными датировками погребённых почвенных горизонтов; 4 – подписи уровней, овалами выделены значимые деревья; 5 – характерные элементы местности, используемые в качестве ориентиров в статье: 1 – «ворота», 2 – лавовый поток, 3 – нижняя станция современной канатной дороги, 4 – база МГУ, 5 – «лесной остров»

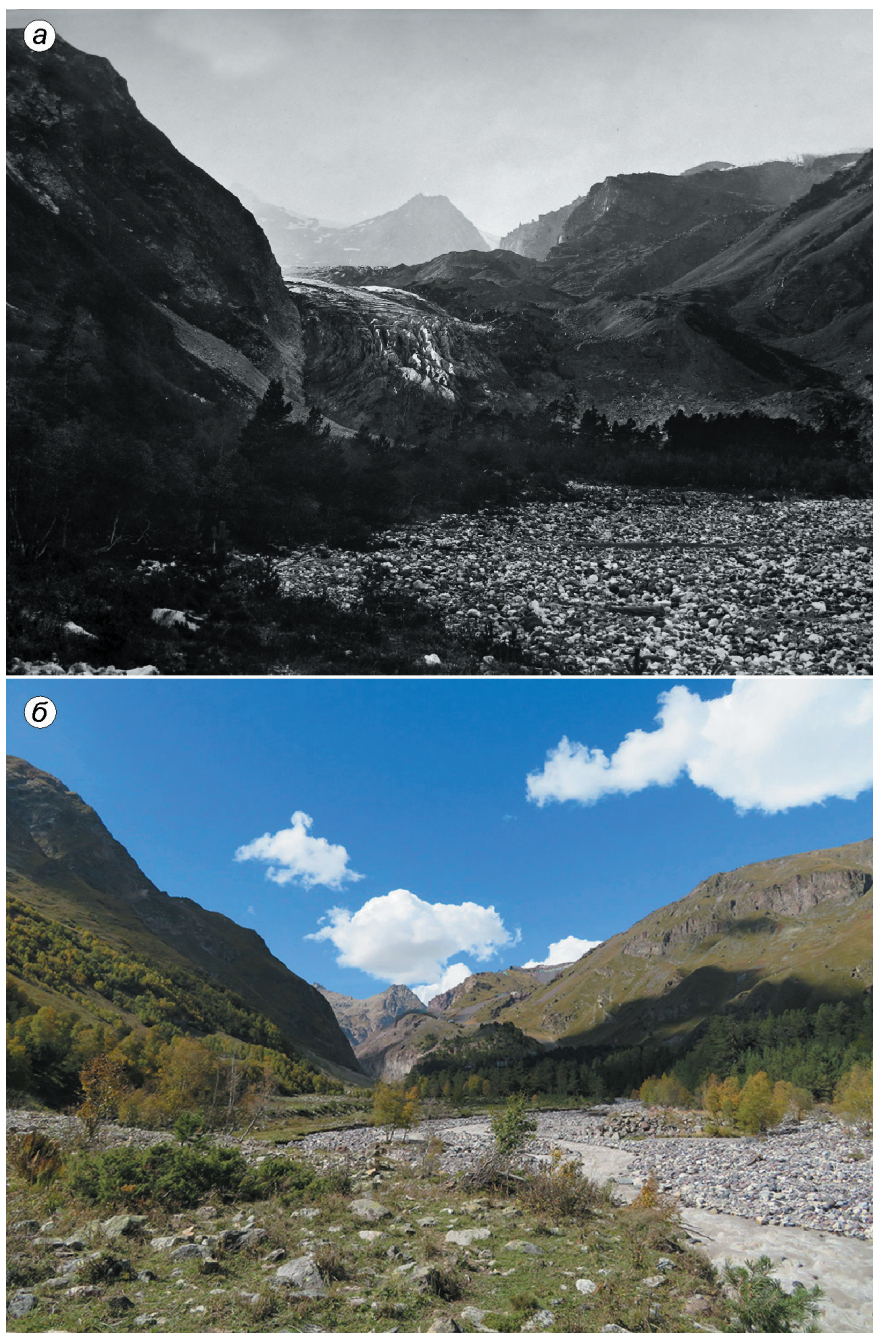
**Fig. 1.** Scheme of the forefield of the Greater Azau glacier.

1 – positions of trees and its ages on the moraines (age of first tree-ring adjusted for missing rings in the center of the core); 2 – positions and names of moraines; 3 – positions of the sections with radiocarbon dating of buried soil horizons; 4 – names of levels, The significant trees are marked by ovals; 5 – typical elements of the surface used as landmarks in the article: 1 – «gate», 2 – lava flow, 3 – the lower station of the modern cable car, 4 – the base of Moscow State University, 5 – «forest island»

поскольку, судя по их описаниям и фотографиям, все эти морены имели тогда свежую поверхность. Очевидно, что левая часть языка ледника Большой Азау распространялась почти до середины лавового потока в 1960–80-х годах. Каждая из подвижек ледника была немного меньше предыдущей, так как валы расположены близко один от другого.

Описанные морены наложены на маломощный почвенный горизонт, который присутствует в разрезе 2 (см. рис. 1) на глубине примерно 50–70 см от поверхности. Его радиоуглеродный возраст –  $130 \pm 20$  лет (IGAN ams – 6826, датированы угли). Хотя при калибровке таких молодых возрастов получается календарная дата с

большим временным разбросом (1680–1939 гг., 95,4%), эта датировка подтверждает время перекрытия почвенного горизонта ледниковыми отложениями во время последней серии осциллирующей ледника Большой Азау в середине XIX в. Непосредственно проследить переход исследуемых нами береговых морен в конечные в настоящее время сложно, так как рельеф в этом месте существенно изменён в результате антропогенной деятельности, однако отметим, что ранее эти морены были описаны в работах Н.А. Володичевой [17]. Внешняя часть лавового потока, на которой расположены упомянутые здесь береговые морены, гораздо более древняя и выглядит задернованной уже на фо-



**Рис. 2.** Фотографии ледника Большой Азау:

*a* – сделана В. Селла в 1889 г. с правого берега р. Баксан в сторону лавового потока; *б* – повторная фотография, сделанная В.Н. Михаленко в 2014 г.

**Fig. 2.** Photographs of the Greater Azau glacier:

*a* – made by V. Sella in 1889 from the right bank of Baksan river toward the lava flood; *b* – repeated photograph, made by V.N. Mikhalenko, 2014

тографии В. Селлы. Почвенный разрез 1 в этой части (см. рис. 1) свидетельствует о длительном ненарушенном осадконакоплении и почвообразовании, т.е. отсутствии ледника на этой поверхности, как минимум, на протяжении последних

4420±80 (n22268, Hannover, угли) радиоуглеродных лет [1, 4]. Лишайники на этой поверхности достигают диаметра 200–230 мм.

**Конечные морены второй половины XIX и начала XX вв.** Положение конца ледника Большой



**Рис. 3.** Панорама левого борта долины р. Баксан около пос. Азау (фото В.Н. Михаленко, 2014 г.)  
 1 – названия морен; 2 – характерные элементы местности, используемые в качестве ориентиров в статье: см. рис. 1  
**Fig. 3.** Panorama of the left bank of the Baksan river near Azau village (photo of V.N. Mikhailenko, 2014).  
 1 – names of moraines; 2 – typical elements of the surface used as landmarks in the article

Азау в 1880-х годах и в 1911 г. зафиксировано на картах А.В. Пастухова и Г. Бурместера. Попытка привязать карту А.В. Пастухова к современным снимкам показывает, что хребты, реки и скалы привязываются достаточно хорошо, но контур ледника при этом проходит по хребтам. Таким образом, положение конца ледника по данной карте можно определить лишь приблизительно. На плане Г. Бурместера конец ледника находится выше «ворот», что подтверждают фотографии того времени [5]. Как было показано ранее И.А. Лабутиной [18], система высот этой карты ниже современной примерно на 20 м [8]. Положение конца ледника с карты военных топографов отмечено на плане Г. Бурместера. Судя по отметке на данной карте, конец ледника в 1889 г. находился приблизительно на 230 м ниже «ворот».

На дне долины, ниже скальных «ворот», можно выделить несколько конечно-моренных валов, хотя некоторые участки существенно повреждены и изменены лавинной и селевой деятельностью. Положение и возраст валов определены Н.А. Володичевой по историческим и геоморфологическим данным [4]. На морене М1 (см. рис. 1), которую Н.А. Володичева датирует 1890 г., дата первого годовичного кольца самого старого дерева – 1941 г. Морена 1880-х годов [4] М2 выражена чётко и спускается в виде двух близкорасположенных, почти параллельных валов в долину. На ней растёт дерево, появившееся здесь в 1934 г. Между моренами М2 и М3, возможно, существуют следы ещё двух стадий, однако находятся они в зоне действия лавины и их следы плохо читаются в рельефе. На этой поверхности самое старое дерево – 1914 г. Морена М3, по данным Н.А. Володичевой, относит-

ся к 1870-м годам. Перед ней растёт сосна, дата первого годовичного кольца которой датируется 1893 г. Между мореной М3 и следующей – «мореной Абиха» (М4), состоящей из двух валов (4А и 4В), есть дерево, поселившееся здесь в 1883 г. Самое старое дерево на валу – 1888 г.

Учитывая поправки на высоту бурения и время колонизации поверхности соснами (общая поправка 10–20 лет), можно сделать вывод, что дендрохронологический метод не противоречит историческим датировкам Н.А. Володичевой: ни одно дерево не превосходит по возрасту исторические даты поверхности морен и участков зандра между ними. Возраст деревьев вниз по долине увеличивается, что также косвенно подтверждает достоверность датировок. Точность метода, к сожалению, не позволяет уверенно различить поверхности, возраст которых отличается на 1–2 десятилетия. Однако следует учитывать, что почти весь этот участок подвергается воздействию лавин, поэтому растительность на нём сильно изменена (рис. 3).

**Дерево, погребённое в морене 1880-х годов.**  
 В морене М2, которая, согласно представлениям Н.А. Володичевой, основанным на исторических данных, датируется 1880-ми годами [4], в 1960-х годах был найден погребённый ствол сосны (координаты: 43.26433° с.ш., 42.47869° в.д., высота 2322 м) (рис. 4). Радиоуглеродный анализ показал, что возраст дерева –  $140 \pm 75$  лет [1] (калиброванная дата – 1650–1960 годы). Е.А. Долгова и др. в 2007 г. сделали попытку перекрёстного датирования керна из этого дерева, в котором было 63 кольца. Сопоставление с имевшейся на тот момент времени хронологией ширины колец сосны из долины



**Рис. 4.** Ствол дерева, погребённый во внешней части морены 1880-х годов  
**Fig. 4.** Tree trunk buried in the outer part of the moraine of 1880s

р. Баксан показало наилучшее совпадение двух кривых в диапазоне 1841–1903 гг. [19]. Поскольку внешние кольца в керне не сохранились, для уточнения времени гибели дерева позже была использована фотография спила этого дерева в более сохранном состоянии, сделанная ранее А.Д. Олейниковым. Таким образом, к дате, полученной путём перекрёстного датирования, добавилось ещё 31 кольцо, которое читается на фотографии по периферии спила, но было утрачено в керне. Установленная дата гибели дерева – 1934 г., и это дерево, с большой долей вероятности, не имеет отношения к наступанию ледника в 1880-х годах. Тогда предположили, что дерево было принесено со склона и с тех пор находилось в полупогребённом состоянии во

внешней части морены. На спиле заметны прижизненные деформированные слои и шрамы, что показывает длительное компрессионное воздействие на дерево. В процессе настоящего исследования был повторно сфотографирован спил дерева с более высоким разрешением. На фотографии удалось выделить все 126 годичных колец, и было проведено сравнение построенной древесно-кольцевой серии с новыми сводными хронологиями, которые с 2004 г. пополнились несколькими сотнями образцов и служат надёжной основой для перекрёстного датирования. Поскольку внешняя часть спила гладкая и внешние кольца имеют хорошую сохранность, дендрохронологическая дата должна быть близка к истинной дате гибели дерева.



Ширину годовых колец измеряли вдоль четырёх радиусов, выбранных на изображении спила. Четыре серии ширины годовых колец тесно коррелируют между собой, а также с измерениями, полученными нами ранее по керну (63 кольца, коэффициенты корреляции варьируют от 0,45 до 0,70) [19]. Высокая согласованность измерений позволила объединить все пять древесно-кольцевых серий в единую «плавающую» хронологию путём осреднения. В настоящей работе датирование «плавающей» хронологии велось относительно нескольких мастер-хронологий, каждая из которых отражает разные ландшафтно-климатические условия. В первую очередь, использовали мастер-хронологию по ширине годовых колец, построенную из образцов сосен, растущих в верховьях долины р. Баксан. Длительность баксанской хронологии (код ВАЗ) достигает 364 лет (1653–2016 гг.) и состоит из 119 древесно-кольцевых серий. Вторая мастер-хронология (код УТЛ) построена на основе образцов сосен, растущих на верхней границе леса долины р. Баксан на склонах хребтов Чегет и Терскол. Её длительность – 318 лет (1694–2011 гг.), и она включает в себя 33 древесно-кольцевых серии. Баксанские хронологии заканчиваются в конце XVII в., поэтому более ранний период остаётся неучтённым. Для расширения периода датировки использовали мастер-хронологии длительностью более 500 лет, построенные для хвойных, растущих на западном Кавказе (долины рек Теберда и Кизгич). Основание для использования мастер-хронологий с западного Кавказа – тесная корреляционная связь, установленная между дендрохронологическими рядами (таблица).

В таблице приведены возможные варианты датировок, полученных относительно нескольких мастер-хронологий. Датировки ранжированы в соответствии со значениями  $t$ -критерия Стьюдента  $T_{test}$ . Если говорить о датировке, полученной путём сравнения плавающей хронологии с самой ближайшей баксанской мастер-хронологией, то период жизни дерева составляет 1759–1883 гг. Однако даже для этой датировки характерны низкие статистические показатели (см. таблицу). Отметим, что сравнение с другими мастер-хронологиями дало разброс дат от конца XVII в. до середины XX в. При этом статистические показатели ( $t$ -критерия Стьюдента и

коэффициент корреляции) – невысокие и отличаются незначительно.

В дендрохронологических исследованиях датировка считается надёжной, когда  $T_{test}$  больше семи [20], в данном случае он не превышает трёх. Причины отсутствия надёжных дат могут быть следующие: а) теоретически дерево может быть старше 500 лет; б) недостаточно качественно измерена ширина годовых колец по фотографии пня; в) дерево могло расти на склоне под воздействием лавин, что привело к формированию асимметричных годовых колец и стало причиной низких значений корреляции. В пользу последнего довода говорит и наличие многочисленных прижизненных шрамов, обнаруженных на спиле. Наиболее вероятные годы жизни погребённого дерева, согласно новым данным, 1759–1883 гг., вторая по вероятности датировка – 1826–1950 гг. К сожалению, результаты перекрёстного датирования по-прежнему не могут быть признаны однозначными и достоверными из-за низких коэффициентов корреляции ширины колец этого образца с хронологией верховьев долины р. Баксан, относительно которой проведено датирование.

«*Морена Абиха*» (М4А и М4В). Положение морены 1849 г. определяется исследователями в основном на основе гравюры конца ледника, сделанной академиком Г. Абихом с натуры; см. с. 314 в работе [4]. Судя по этой гравюре, ледник Большой Азау целиком заполнял глубокий каньон, а при выходе из него растекался в виде широкой лопасти от одного борта долины до другого. Однако рисунок сделан издалека и, учитывая плоскую долину, точно определить положение морены трудно.

По представлениям Н.А. Володичевой, «морена Абиха» (М4) расположена на высоте примерно 2295 м, под базой МГУ. Здесь, по внутреннему склону высокой береговой морены спускаются два моренных отрожка – М4А и М4В – на расстоянии около 10–20 м один от другого. В нижней части долины они соединяются с конечно-моренным комплексом, сложенным крупными, обработанными ледником валунами. Очевидно, ледник в этом месте наступал дважды – следы этих наступаний чётко выражены в виде морен. По дендрохронологическим данным, эти две стадии наступания различить невозможно. Дата первого годового

## Результаты датировки сосны, погребённой в морене ледника Большой Азау

Номер хронологии	Датировка, годы	<i>t</i> -критерий Стьюдента $T_{test}$	Коэффициент корреляции Пирсона $C_{corr}$	Общий период с мастер-хронологией, лет
<i>Баксанская (BAZ, сосна, 1653–2016 гг.)</i>				
1	1759–1883	3,2	0,28	125
2	1732–1856	2,6	0,23	125
<i>Баксанская верхней границы леса (UTL, сосна, 1694–2011 гг.)</i>				
1	1826–1950	2,9	0,25	125
2	1630–1754	2,7	0,33	60
<i>Западно-Кавказская хронология верхней границы леса (KYZ, сосна, 1550–2007 гг.)</i>				
1	1594–1718	3,4	0,29	125
2	1535–1659	2,6	0,24	109
<i>Западно-Кавказская хронология верхней границы леса (D08PE, пихта и ель, 1423–2015 гг.)</i>				
1	1582–1706	3,0	0,26	125
2	1540–1664	2,9	0,25	125

\*BAZ – хронология по ширине годичных колец сосны из предполя ледника Большой Азау продолжительностью 364 года (с 1653 по 2016 г.); UTL – хронология по ширине годичных колец сосны из долины р. Баксан, но в отличие от хронологии BAZ образцы отобраны на верхней границе леса; KYZ – хронология по ширине годичных колец сосны, растущей на Западном Кавказе в долине р. Кизгич. Её использование для датирования обусловлено большой продолжительностью – 458 лет (с 1550 по 2007 г.); D08PE – хронология по ширине годичных колец ели и пихты, растущих на Западном Кавказе в долине р. Кизгич. Эта датировка, как и хронология KYZ, используется нами для датирования из-за большой продолжительности – 593 года (с 1423 по 2015 г.). Датировка проводилась относительно четырёх хронологий, название, видовой состав и продолжительность которых выделены в таблице курсивом. Для каждого варианта показаны две наиболее вероятные датировки с самыми высокими значениями *t*-критерия Стьюдента  $T_{test}$  и коэффициентами корреляции Пирсона  $C_{corr}$ . Все коэффициенты корреляции значимы при  $p < 0,05$ .

кольца самого старого дерева на одном из этих валов датируется 1888 г., что, учитывая поправки и возможные погрешности, не противоречит исторической оценке положения вала. Г. Абих указывал, что ледник спускался в старый лес, где росли деревья возрастом 80–100 лет. Согласно дендрохронологическим данным, первые деревья на дне долины Большой Азау, которые в 1849 г. могли быть описаны как «старый лес», находятся на террасе именно за этой мореной и появились они в 1800-е годы. Исследование аномалии прироста одного из деревьев, имеющего характерный изгиб ствола, который теоретически мог быть вызван ударом обломка, скатившегося с «морены Абиха», показало, что повреждение относится к 1879–1884 гг. и не связано с деятельностью ледника.

**Терраса и морена ниже «морены Абиха» (M4).** За мореной M4 начинается терраса шириной до 20–30 м и высотой 2–3 м над рекой. На террасу наложен невысокий (до 3 м) хорошо выраженный моренный вал M5. Дата первого годичного кольца самого старого дерева на этой террасе – 1801 г., на морене – 1803 г. Очевидно, что терраса и морена образовались не позже конца

XVIII в. Лишайники на поверхности морены достигают 120 мм, что, по самым консервативным оценкам (линейная модель роста [13]), составляет более 400 лет. Морена M5 выходит к реке прямо напротив фрагмента частично размывтой морены, покрытой лесом, и, по-видимому, представляет собой часть этого моренного комплекса, возраст которого, как будет показано далее, существенно древнее двух столетий.

За мореной M5 начинается ещё одна низкая терраса высотой примерно 1 м над урезом воды. Здесь река делает резкий поворот, наклон русла заметно увеличивается, а на моренные отложения накладываются более молодые отложения селевых потоков конуса Гарабаши. Вдоль русла реки идёт невысокий прерывистый вал, вероятно морена M6, на которой растут старые деревья. Минимальный возраст этой поверхности – середина XVII в. (дата первого годичного кольца самого старого дерева – 1689 г.). Ещё ниже по долине сосновый лес на правом борту почти полностью уничтожен лавинами (по данным наблюдений сотрудников МГУ).

**Конечные морены в центральной части долины р. Баксан («лесной остров»).** В центральной



Рис. 5. Береговая морена М8

Fig. 5. Lateral moraine M8

части долины, в русле р. Баксан сохранилось два фрагмента конечных морен, частично эродированных рекой и покрытых старым сосновым лесом. Одна из них находится напротив места, где выклинивается вал М5 на левом борту, минимальный возраст которого конец XVIII в. На морене в центре долины лес гораздо старше: здесь растут деревья, первое годичное кольцо которых датируется 1666, 1676 и даже 1598 гг. Последнее – самое старое живое дерево, обнаруженное нами в долине р. Баксан (год образования первого кольца – 1598). Максимальный размер лишайников на этой поверхности достигает 120–130 мм и совпадает с таковым на морене М5. Таким образом, минимальный возраст морены М5 оценивается как конец XVI в., но её истинный возраст может быть более древним.

**Береговая морена «XVII в.».** Береговая морена «XVII в.» (М8) тянется вдоль русла р. Баксан почти от станции канатной дороги – сначала в виде плоской террасовидной площадки, затем в виде вала, который имеет крутой склон, обращённый к реке, а с дистальной стороны выглядит как невысокий, но также явно выраженный вал (рис. 5). Он хорошо читается в рельефе

до вреза ручья Гарабаши. Непосредственно на гребне этого вала выше «морены Абиха» деревьев старше 1880-х годов не обнаружено. Примерно на 5–7 м ниже гребня береговой морены «XVII в.» в районе базы МГУ со стороны р. Баксан находится плоская поверхность шириной 20–30 м и длиной около 250 м – камовая терраса. На поверхность террасы наложен невысокий моренный вал – М7. Терраса выклинивается у калитки базы МГУ, а в нижней части подрезана ручьём Гарабаши (см. рис. 1). Над руслом р. Баксан терраса возвышается на 12–15 м. Многие сосны на камовой террасе поражены сердцевинной гнилью, однако одно дерево относится к середине XVII в. (возраст первого годичного кольца – 1656 г.). Камовая терраса и наложенная на неё морена расположены с внутренней стороны морены М8, т.е. имеют более молодой возраст, чем морена М8. Вместе с тем они явно старше морен М5 и М6, которые находятся ниже, почти на уровне русла реки. Минимальный возраст морены М5, согласно данным дендрохронологии, – вторая половина XVI в. Таким образом, высокая терраса и расположенная на ней морена М7 старше второй половины XVI в. Ещё стар-

ше береговая морена М8, которую принято называть мореной «XVII в.».

**Морены XIII–XIV в.** Отложения, на которых расположены автомобильная и канатная дороги, десятки гостиниц и других строений, существенно изменены как антропогенной деятельностью, так и селевыми, и лавинными процессами. Генезис этих отложений до конца не ясен. Вероятно, это остатки старых морен, маркирующих наступания ледников верховьев долины р. Баксан. Старые деревья сохранились только в центральной части комплекса. Условно в пределах этого комплекса можно выделить три гипсометрических уровня.

**А** – верхняя, первая ступень. Первый верхний уровень морен наиболее пострадал от деятельности людей. Здесь, под лавовым потоком, расположены станция канатной дороги, кафе и гостиницы. Именно на этом уровне проходит граница наступаний ледника Большой Азау в XIX в. и в более ранние периоды. Здесь же находится ствол дерева, ещё недавно живого, а сейчас – без кроны и ветвей. Дерево оказалось очень старым – первое годичное кольцо датируется 1678 г. (1678–2011 гг.). Это означает, что данная поверхность не подвергалась оледенению как минимум с середины XVII в.

**В** – средняя, вторая ступень. На второй ступени расположены гостиницы «Чыран Азау» и «Азау Премьер». В 2018 г. здесь находилось пять старых сосен и несколько свежих пней от старых спиленных деревьев. Дата первого годичного кольца самого старого пня, определённого прямым подсчётом количества колец, – примерно 1693 г., а самые старые живые сосны появились здесь в первой половине XVIII в. Со стороны дороги поверхность второй ступени повреждена селом и лавинами, возможно, это случалось неоднократно. У дороги находится разрез отложений (разрез 5), где хорошо видны два различных горизонта, между которыми на глубине 1 м имеется слабовыраженная погребённая почва. Её возраст по  $^{14}\text{C}$  датировке – современный (ИГАН-4611). На поверхности растут молодые сосны (самая старая сосна датируется 1951 г.). Чуть выше по долине, за дорогой, у автомобильной стоянки вскрывается разрез склоновых отложений с тремя погребёнными почвами (разрез 3), имеющими возраст (снизу–вверх)  $380\pm 60$  (ИГАН 3938),  $170\pm 50$  (ИГАН 3939) и мо-

ложе 170 л.н. (последняя не датирована) соответственно [21]. Возможно, погребённая почва в описанном разрезе соответствует верхнему уровню в селевых отложениях у дороги.

**С** – нижняя, третья ступень. На третьем уровне, где расположена гостиница «Балкария», дата первого годичного кольца наиболее старого из сохранившихся деревьев – 1815 г. Третья ступень заканчивается довольно крутым склоном над Поляной Азау, где находится база МГУ. На этом склоне был пройден шурф и получена  $^{14}\text{C}$  датировка погребённой почвы  $340\pm 95$  л.н. [1] (разрез 4). Калиброванный возраст образца составляет 1400–1850 гг. (93,6%). Пять наиболее старых деревьев, пробуренных на этой поверхности в 2002 г., не имеют точной пространственной привязки. Деревья располагались над Поляной Азау на морене, которая условно называлась мореной XIII в., т.е. на её второй или третьей ступени. Дата первого годичного кольца самого старого дерева – 1640 г. Хотя радиоуглеродная и дендрохронологические датировки формально не противоречат друг другу, есть основания полагать, что поросшие старым лесом отложения, на которых стоит база МГУ и другие строения, имеют более древний возраст. Как было показано ранее, береговая морена, которая наложена на эти отложения, имеет возраст старше второй половины XVI в., а по косвенным данным (размер лишайников на морене М5) – ещё более древний.

### Обсуждение результатов

Несмотря на выполненный нами детальный дендрохронологический анализ морен ледника Большой Азау, многие вопросы, связанные с колебаниями ледника, остались неразрешёнными. Это связано как с естественными ограничениями дендрохронологического метода, так и с уничтожением растительности лавинами, сходящими с правого борта долины р. Баксан на дно долины, где расположены конечные морены ледника. Принципиальное значение для определения положения конечных морен XIX в. имеет вопрос о том, было ли дерево, погребённое в морене 1880-х годов, *in situ* или оно росло в другом месте? По мнению Г.К. Тушинского и В.И. Турманиной, которые его обнаружили, оно было

погребено ледником, который наступал и вторгался во взрослый хвойный лес (дерево оставалось под слоем морены, пока его не раскопали в 1960-х годах). Но если 126-летнее дерево росло там, где найдено, то «морена Абиха» (1849 г.) должна быть выше него по долине. Иначе дерево не могло бы сохраниться на высоте 2322 м на дне долины при наступании ледника до высоты 2295 м в 1849 г. Это справедливо для обоих вариантов возможных перекрёстных датировок погребённого дерева – 1759–1883 гг. и 1826–1950 гг. Более того, если просто отсчитать назад 126 лет от даты находки дерева в 1960-х годах, то получится, что оно должно было появиться на месте морены 1880-х годов в конце 1830-х – начале 1840-х годов, что также невозможно, учитывая его собственный возраст. Таким образом, модель *in situ* в любом случае предполагает, что положение «морены Абиха» на высоте около 2295 м напротив базы МГУ определено неверно. Следствием положения модели *in situ* является вывод, что морены 1870-х и 1880-х годов должны быть расположены выше по долине по отношению к тому положению, где они отмечены сейчас, а участок долины на высоте 2322 м и ниже уже более 200 лет не покрывался ледником.

По предположениям Н.А. Володичевой, это дерево могло быть перемещено во время наступания ледника в 1849 г., вероятно, с левого борта долины, где растут старые деревья. Ледник, выходя из каньона, очень мощно растекался, увлекая и перемещая растущие в районе современной канатной дороги деревья. Дерево сохранилось, так как было перемещено тальми водами и засыпано мореной после отступления ледника. К сожалению, нам не удалось достоверно определить, было ли укоренено дерево, погребённое в морене 1880-х годов или оно было принесено из другого места, так как залегание комля нарушено. В настоящее время комель дерева и ствол разобщены: вероятно, дерево было распилено при отборе образцов на радиоуглеродное датирование в 1990-х годах. На имеющемся изображении (см. рис. 4) комель и ствол дерева ориентированы в разные стороны: комель с корнями – в направлении правого борта, а ствол – в направлении левого. По личному сообщению профессора О. Бауме, который участвовал в отборе образцов на радиоуглеродный анализ в 1990-х годах, дерево укоренено не было.

Положение морены 1840-х годов в районе базы МГУ оспаривается Е.А. Золотаревым и И.Б. Сейновой [22], которые на основании рисунков, описаний и геодезических оценок Г. Абиха [2] считают, что конец ледника в момент посещения его Г. Абихом находился выше, примерно на уровне современного здания канатной дороги. Деревья, растущие на дне долины между «воротами», занятыми ледником в начале XX в., и высотой 2295 м, где расположена «морена Абиха», по предположению Г.К. Тушинского и А.В. Володичевой, не дают прямого опровержения выдвинутой гипотезы, так как на этом пространстве и на самом валу «морены Абиха» не встречаются деревья старше 1880-х годов. Отсутствие более старых деревьев может быть связано с тем, что многие из них были уничтожены интенсивной лавинной и селевой деятельностью в долине в XX в. Возраст растущих на валу «морены Абиха» сосен показывает, что после отступления ледника в 1850–70-х годах, т.е. через 20–30 лет, на моренном валу могли вырасти деревья. Тем не менее, само описание Г. Абиха и некоторые косвенные дендрохронологические данные – серьёзные поводы для дискуссии. В приложении к этой статье мы приводим перевод описания конца ледника Большой Азау из работы Г. Абиха 1875 г. (см. стр. 286).

Е.А. Золотарев подчёркивал, что в районе базы МГУ правой «короткой» морене ледника нет возможности упереться в гладкую гранитную стенку, так как её там нет. Н.А. Володичева оспаривает это утверждение и полагает, что стенка, которую имел в виду Г. Абих, находится на участке склона выше конуса выноса лавиносбора № 2 (по Каталогу лавин МГУ, см. рис. 1.). Таким образом, вопрос о том, где находилась «морена Абиха», т.е. каких размеров ледник достиг во время наступания в 1840-х годах, к сожалению, остаётся дискуссионным.

Немногие сохранившиеся старые деревья, которые растут сейчас на моренах ледника Большой Азау, дают возможность оценить максимально возможные границы распространения ледника в XIX в. «вширь». Так, в долине заметен невысокий моренный вал, перед которым стоит сухое дерево, первое годичное кольцо которого сформировано в 1678 г. (см. рис. 1). Неподдалеку, за старым зданием канатной дороги, ещё в 2018 г. находился старый пень диаметром боль-

ше метра, к сожалению, уже тогда не пригодный для дендрохронологического датирования из-за плохой сохранности. В 2019 г. на этом месте началось строительство нового здания и пень был убран. Данные объекты показывают, что с конца XVII в. ледник не покрывал эту территорию. Важную информацию можно получить и учитывая расположение дерева D36S119, первое годовичное кольцо которого сформировано в 1758 г. (см. рис. 1). Оно расположено на полочке, которая идёт вдоль внутреннего склона самой высокой береговой морены «XVII в.», ниже её верхнего края на 5–7 м. Расположение дерева доказывает, что ледник не доходил до данного уровня в момент посещения его Г. Абигом. Из описания Г. Абиха следует, что ледник «*превысил высоту моренной кромки на 30–40 футов (9–12 м)*», однако, о каком конкретно месте идёт речь, из этого описания непонятно.

Ещё одна проблема в долине Большого Азау связана с шириной конца ледника в середине XIX в. На рисунке Г. Абиха (см. с. 314 в работе [4]), который сделан издали, фронт ледника простирается от одного борта долины до другого, оставляя незанятой лишь небольшое возвышение по левому борту. Н.А. Володичева [17] предположила, что в середине XIX в. ледник распространился по всей долине, но его левый язык опускался до более низкого уровня. Согласно дендрохронологическим данным, это возможно до высоты 2352 м, где находится дерево, первое годовичное кольцо которого сформировано в 1678 г. Вторым ограничением служит дерево, растущее на береговой морене, дата формирования первого годовичного кольца которого – 1758 г. Положение береговых морен, расположенных на лавовом потоке (см. рис. 1), показывает, что ледник в своей левой части распространялся до станции новой канатной дороги, вероятно, во второй половине XIX в., но замыкание этих морен происходило на дне долины. Это можно проследить по фрагментам береговых морен, кое-где сохранившихся на внутренней поверхности старой береговой морены М7.

Благодаря сохранившимся старым деревьям в долине ледника Большой Азау, с помощью дендрохронологических исследований появилась возможность уточнить возраст морен старше двух веков. Фактически все морены, расположенные ниже высоты 2295 м (начало «лес-

ного острова») в моренном комплексе Большого Азау, образовались ранее второй половины XVI в., включая и самую высокую береговую морену, которую принято называть мореной «XVII в.». Предположительно, она выклинивается на высоте 2273 м, где р. Баксан делает крутой поворот. Между этим местом и «лесным островом» на цифровой модели рельефа выделяются пять гряд, которые могут быть как следами прошлых наступаний ледника, так и селевыми отложениями конуса Гарабаши.

Следы стадии наступания XVII в., которая выделена вероятностно по аналогии с Альпами [7], на предгорьях Большого Азау пока не выявлены. Однако это не означает, что такого наступания не было, поскольку сходство климатической и ледниковой истории на Кавказе и в Альпах подтверждено недавними аналитическими исследованиями [13, 23]. В частности, показано, что колебания летней температуры, восстановленные по дендрохронологическим данным, и особенности колебания ледников в последние столетия на Кавказе и в Альпах весьма схожи. Основные периоды угнетения прироста деревьев на моренах Большого Азау наблюдались в 1620-е, 1640-е, 1700–1715-е, 1720–50-е, 1806–1815-е, 1840-е и 1860-е годы. Наиболее детальная работа по реконструкции колебаний трёх ледников в Альпах, основанная на сравнении их изображений с середины XVI в., показывает удивительную синхронность их колебаний: а) ледник Боссон – 1610/1643, 1685, 1712, 1777, 1818 (максимум), 1854, 1892, 1921, 1941 и 1983 гг.; б) ледник Мер де Гляс – 1644 (максимум), 1821 и 1852 гг.; в) ледник Гриндельвальдский – около 1600 г. (максимум) и в 1855–1856 гг. [3]. Принимая во внимание разную скорость реакции отдельных ледников на климатические изменения, отметим, что большинство этих дат совпадают с периодами угнетения прироста сосен на предгорьях Большого Азау в 1640-е, 1710-е, 1800-е, 1840-е и 1860-е годы.

Более ранние наступания (до 1655 г.) ледника Мер де Гляс датированы с помощью дендрохронологического анализа древесины, погребённой в его моренах. Амплитуда наступаний в целом увеличивалась со временем. Три основных неогляциальных максимума датируются VII, XII, XIII вв. и второй половиной XIV в. [24]. По аналогии с Альпами можно предполагать, что в ком-

плексе морен ледника Большого Азау содержатся следы многочисленных неогляциальных наступаний, которые далеко не ограничиваются наступаниями XIII, XVII и XIX вв. Попытки использовать радиоуглеродный метод для датирования отложений в долине Большого Азау пока дали ограниченные результаты. Несколько разрезов с погребёнными почвами в морене, а также в склоновых и лавинных отложениях дают близкий возраст:  $380 \pm 60$ ,  $440 \pm 135$ ,  $340 \pm 95$  лет [4, 21]. Близость этих датировок (интервал 340–440 радиоуглеродных лет или XV–XVIII вв.) даёт основание выдвинуть гипотезу о благоприятном для почвообразования периоде в высокогорьях Баксана и сокращении размеров ледников в это время, однако при калибровке радиоуглеродных дат временной диапазон этого периода всё ещё остаётся слишком широким (четыре столетия).

В 2019 г. В. Жомелли и О. Соломиной с поверхности морен ледника Большой Азау были отобраны образцы на анализ космогенных изотопов. Есть надежда, что с помощью нового метода удастся окончательно ответить на вопросы, сформулированные в данной статье и во многих публикациях предшественников.

### Заключение

Минимальный возраст отложений, сформированных ледником Большой Азау, был определён на основе дендрохронологического анализа более 150 сосен, растущих на Поляне Азау. Дополнительно использованы исторические свидетельства, картографические данные, материалы дистанционного зондирования, а также результаты лихенометрических исследований и радиоуглеродных датировок погребённых почв. Всё это позволило определить границы распространения конца ледника в конце XIX в., а также выяснить, что самая высокая и наиболее явно выраженная береговая морена, условное название которой морена «XVII в.», образовалась ранее конца XV в. Повторно исследован ствол сосны, погребённой в отложениях на дне долины, который был обнаружен в 1960-х годах. Ранее с помощью радиоуглеродного метода ствол был датирован  $140 \pm 75$  л.н. [1] (калиброванная дата – 1650–1960 гг.). Наиболее вероятные годы жизни погребённого дерева по дендрохронологическим данным – 1759–1883 гг.,

вторая по вероятности датировка – 1826–1950 гг. К сожалению, результаты перекрёстного датирования по-прежнему не могут быть признаны однозначными и достоверными из-за низких статистических оценок датировки. Вопрос о положении морены 1849 г., которую описывал Г. Абих, остаётся дискуссионным [2].

**Благодарности.** В многолетних работах на моренах ледника Большой Азау участвовали многие наши коллеги, которым авторы приносят самую искреннюю благодарность. Мы благодарим Г.А. Носенко, И. Хмелевского, П.Д. Полумиеву, А.Д. Олейникова В.Н. Михаленко, Т.М. Кудерину, В. Жомелли, В.В. Кузнецову, В.В. Мацковского, В. Шишкова. За помощь в переводе статьи Г. Абиха мы благодарим Е.С. Чиликину. Стереопара снимков Pléiades, использованная в этой статье, была предоставлена Ледниковой обсерваторией Плейадс, созданной Французским космическим агентством (CNES). Работа выполнена по теме «Оледенение и сопутствующие природные процессы при изменении климата» № 0148-2019-0004 Института географии РАН и при поддержке проекта «Изменение криосферы Земли под влиянием природных факторов и техногенеза» АААА-А16-116032810095-6 кафедры криолитологии и гляциологии Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

**Acknowledgments.** Many of our colleagues have participated in the long-term work on the moraines of the Greater Azau glacier, to whom we bring the most sincere gratitude. We thank G.A. Nosenko, I. Khmelevsky, P.D. Polumiev, A.D. Oleinikova V.N. Mikhalenko, T.M. Kuderin, V. Jomelli, V.V. Kuznetsov, V.V. Matskovsky, V. Shishkov. For help in translating G. Abikh's article, we thank E.S. Chilikin. The Pléiades stereo-pair used in this study was provided by the Pléiades Glacier Observatory initiative of the French Space Agency (CNES). The work was carried out on the topic «Glaciation and associated natural processes during climate change» № 0148-2019-0004 of the Institute of Geography RAS and with the support of the project «Change of the Earth's cryosphere under the influence of natural factors and technogenesis» АААА-А16-116032810095-6 of the Department of Cryolithology and Glaciology of Moscow State University named after M.V. Lomonosov.

**Перевод Е.С. Чиликиной фрагмента работы Г. Абиха про ледник Большой Азау  
(см. с. 97–102 работы [2])**

Баксанский ледник. Было 21 октября 1849 года, когда, с трудом поднимаясь вверх по этим древним моренам, я достиг внешнего края гигантской насыпи из обломочных пород и тем самым вздымающегося прямо передо мной ледника. Здесь открывался вид, очень похожий на тот, что в 1848 году явил взору ледник Алетч, находившийся в процессе необычайного продвижения вперёд. Продвинувшись вперёд на расстояние, намного превосходящее средние показатели, ледник достиг конечной или боковой морены более ранних периодов, которая успела зарости пихтами возрастом от 80 до 100 лет. Некоторые деревья оказались поваленными, и, будучи расколотыми в щепы в большей или меньшей степени, они виднелись на границе льда и обломочных масс; другие, перевалившиеся на лёд, частично застряли в нём и торчали из него либо кроной, либо нижним концом ствола и корней. О сильном увеличении ледника свидетельствовало также то, что на расстоянии примерно 1500 футов от его конца давление ледяного потока, преимущественно направленное в левую сторону, стало причиной поверхностного смещения морены, и в процессе формирования находилось недавно возникшее, выходящее за пределы морены разветвление ледника. Там, где он захватил старую морену, ледник имел ширину 1430 футов. Лёд с очень высоким содержанием воздушных пузырьков, имеющий брекчиевую структуру и потому легко разрушающийся, превышал высоту края морены на 30 или 40 футов и при довольно крутом ступенчатом наклоне ледника вниз позволял дать лишь неточную оценку абсолютной мощности льда в диапазоне от 70 до 80 футов. Ледник, теснивший перед собой обломки более старых морен, заканчивался выпуклостью, выступающей подобно предгорью, у основания которой под широким, но низким сводом стремилась вперёд большая часть реки Баксан. Мои измерения, основанные на соответствующих, тщательно проведённых наблюдениях в Пяти-

горске, зафиксировали абсолютную высоту этой точки равную 7647 футам. На правой стороне ледника была видна только короткая морена, которая, направляясь по долине вверх, вскорости упиралась в гладкую гранитную стену. Боковая морена по левую сторону ледника, напротив, представляла собой значительную, однако заметно зауженную по всей своей длине прибывающим потоком льда горную гряду, которая поднималась примерно на  $1\frac{1}{2}$  версты вверх по долине, полностью переходя в обломочные массы края лавового потока, скрывающегося под ледником. От ожидаемого гуффра остался слабый след снизу от места слияния обоих рукавов ледника по высоте в виде похожих на грязь борозд неравной ширины. Не имея видов на повторное, сравнительное посещение ледника в будущем, я, будучи и без того ограниченным во времени, вообще не предпринял никаких дальнейших измерений составных частей ледника и довольствовался тем, что зафиксировал всю территорию моих наблюдений на рисунке, который я исполнил с максимальной точностью при помощи измерения углов карманным секстантом с расстояния примерно  $3\frac{1}{2}$  вёрст по прямой, с высокой и легко могущей быть найденной снова точки, которая находится на левой стороне Баксана, сверху от места его слияния с Терсколом. Имея при себе этот рисунок при возвращении сюда 17 сентября 1873 года, я, находясь как раз на той самой точке, сразу увидел весь объём произошедших с ледником за прошедшие долгие 24 года изменений в их вполне понятной мне взаимосвязи. Двигаясь от временной стоянки по проложенному ранее пути, я достиг старой морены и мог, вскоре убедившись в полной её сохранности, с уверенностью найти на её вершине ту самую точку, из которой исходили мои более ранние наблюдения. Все внешние признаки, наблюдаемые отсюда, полностью подтверждали заявленное уменьшение ледника: я кратко их резюмирую. Ледник, по которому я совершал вос-



хождение на добрые 30 футов от этого места, исчез; он отступил на приличное расстояние, как бы просев сам в себя. Внутренний склон кажущейся теперь очень высокой морены имел на поверхности множественные террасы и с большой крутизной спускался к лежащему глубоко внизу дну долины, которая, имея существенную ширину и будучи покрыта беспорядочными и невысокими горками с обломками горных пород в виде булыжников и валунов, с небольшим уклоном поднималось к леднику. Внешний склон морены был недоступен из-за засохших пихтовых стволов и веток, наваленных друг на друга на и между огромными глыбами льда, и потому было бессмысленным спускаться вдоль острого края морены к вдающемуся глубоко в обломочные массы ущелью, в которое стекали спадающие каскадом со дна долины воды. Лишь с некоторыми усилиями, двигаясь вдоль внутреннего склона, в верхней части которого в большом количестве в разных плоскостях выступали растрескавшиеся и выглядящие так, как будто они отшлифованы, стволы деревьев, можно было достичь дна долины, а на нём сперва зону обломков, которая наиболее вероятно представляла собой сохранившуюся часть той конечной морены, что была здесь в 1849 году. Расстояние отсюда до точки, где подо льдом, деформированным обломочными массами, совершался основной сток сильно разветвлённых ледниковых вод, составляло, согласно приблизительным измерениям, 600 футов. Барометрические измерения, соотнесённые, как и тогда, с соответствующими наблюдениями в Пятигорске\*), показали 7630 футов как абсолютную высоту этой точки, в 123 футах над которой, как было определено на основании барометрической разницы, находится описанное выше место на краю морены. Эти показатели были необходимы, чтобы получить верное представление о полном масштабе ущерба, которому подвергся Баксанский ледник с 1849 года ввиду невероятного роста причин, вызывающих колебания (*прим. пер.*: осцилляции) в движениях ледяных потоков. В отсутствие каких-либо сведений о более ранних параметрах этого ледника остаётся полная не-

известность в отношении степени, в которой он, будучи в своём нынешнем состоянии, в целом отстал от среднего показателя своего горизонтального развития. Наиболее надёжное свидетельство в любом случае достигнутого в 1849 году предельного максимума динамики в продвижении вперёд представляют древние пихты, которые 24 года назад были захвачены вместе с нижележащим слоем и повалены находящимся в процессе продвижения вперёд ледником. Ко многим интересным признакам, которые обнаруживает современное состояние Баксанского ледника, относится ставшая теперь полностью различимой благодаря таянию (*прим. пер.*: абляции) геология его залегания на пластах шлаковидного потока лавы, который, начиная от Педаментины (*прим. пер.*: возможно, имя нарицательное, обозначающее «террасовидное возвышение»), предшествовал ледяному потоку вплоть до места вблизи его сегодняшнего конца. Там, где ошлакованные до красно-коричневого лавовые массы, кажется, словно стремятся слиться с мореной, можно увидеть падение их пласта под ледник и убедиться в том, что динамическая работа последнего не смогла разрушить пористый поток трахита, залегающий пластом на гранитной подстилающей породе. Как бы сильно факт постепенного отступления ледника ни занимал внимание жителей долины, было, естественно, всё же трудно получить сколько-нибудь пригодные для работы данные о хронологическом развитии его уменьшения и, в частности, сведения о начале того периода, когда динамика продвижения вперёд, характерная для 1849 года, перешла в ретроградную. Вместе с тем и здесь физические свойства внутреннего склона морены, обращённого в сторону возникшей пустоты, обнаруживают некоторые морфологически важные черты, интерпретация которых со стороны умного, обладающего замечательным даром наблюдателя жителя Уруспи, проверенная там же, совершенно совпадала с выводом, к которому меня привело собственное наблюдение. Уже упомянутые выше выступы в виде террас на внутреннем склоне морены отличались симметричным расположением как в отношении

\*1849 Окт. 22 в. 10. Пятигорск 568,34.  $t = 6,5$  Ледник 457,40  $t = 4,7$  1873 Сент. 17 в. 10. „569/21.  $t = 9,5$ „ 458.00  $t = 4,6$   
Высота над уровнем моря ячейки барометра в Пятигорске в 1840–1856 гг.: в 1873 г., однако, 1783 фута.

друг друга, так и относительно самого края морены. Они облегчали спуск от него ко дну долины, и поскольку они растянулись в равных промежутках вплоть до него, было бы естественно предположить в них в какой-то степени вторичные морены стадии отступления ледника (*moraines en retraite*) и тем самым приписать им значение естественных свидетельств ежегодного уменьшения и отступающего движения ледника. С достаточной определённой можно различить 17 таких соединённых со склоном, почти бульбовидных выступов, и я едва ли найду причину не доверять полученному со слов очевидцев утверждению о том, что образование этих ступеней действительно

произошло в предположенных манере и связи. Если признать некоторую доказательную силу этих обстоятельств, то можно было бы отнести начало периода отступления Баксанского ледника примерно на 1856–1857 годы; предположение, которое является для нас правдоподобным также и по некоторым другим причинам. Тем больше приблизилось к осуществлению намеченное ещё ранее посещение ледника Терскол, ведь представлялось важным узнать, распространились ли на него и если да, то каким образом явления отступления так близко прилегающего к нему ледника Баксан, который пополняется за счёт того же фирнового резервуара.

### Литература

1. *Marcinek J.* Gletscher und Landschaften des Elbrusgebietes: Beiträge zur glazialen, periglazialen und kryogenen Morphogenese im zentralen Kaukasus. Justus Perthes Verlag, 1998. 190 с.
2. *Abich H.* Geologische Beobachtungen auf Reisen im Kaukasus um Jahre 1873. Moskau, 1875. 138 с.
3. *Nussbaumer S., Zumbühl H.* The Little Ice Age history of the Glacier des Bossons (Mont Blanc massif, France): A new high-resolution glacier length curve based on historical documents // *Climatic Change*. 2012. V. 111. С. 301–334. 10.1007/s10584-011-0130-9.
4. Природные процессы на территории Кабардино-Балкарии / Ред. Н.П. Лаверов. М.—Нальчик: изд. РАН, 2004. 438 с.
5. *Burmester H.* Rezent-glaziale Untersuchungen und photogrammetrische Aufnahmen im Baksanquellgebiet (Kaukasus) // *Zeitschrift für Gletscherkunde*. 1913. Bd. 8. Ht. 1. С. 1–41.
6. *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.
7. Оледенение Эльбруса / Ред. Г.К. Тушинский. М.: Изд-во МГУ, 1968. 345 с.
8. *Золотарёв Е.А.* Эволюция оледенения Эльбруса. М.: Научный мир, 2009. 238 с.
9. *Турманина В.И.* Исследования эволюции ледника Джанкуат фитоиндикационными методами // *МГИ*. 1971. Вып. 18. С. 106–109.
10. *Соломина О.Н., Долгова Е.А., Максимова О.Е.* Реконструкция гидрометеорологических условий последних столетий на Северном Кавказе, Крыму и Тянь-Шане по дендрохронологическим данным. М.—Санкт-Петербург: Нестор-История, 2012. 232 с.

### References

1. *Marcinek J.* Gletscher und Landschaften des Elbrusgebietes: Beiträge zur glazialen, periglazialen und kryogenen Morphogenese im zentralen Kaukasus. Justus Perthes Verlag, 1998: 190 p.
2. *Abich H.* Geologische Beobachtungen auf Reisen im Kaukasus um Jahre 1873. Moskau, 1875: 138 p.
3. *Nussbaumer S., Zumbühl H.* The Little Ice Age history of the Glacier des Bossons (Mont Blanc massif, France): A new high-resolution glacier length curve based on historical documents. *Climatic Change*. 2012, 111: 301–334. doi: 10.1007/s10584-011-0130-9.
4. *Prirodnye processy na territorii Kabardino-Balkarii.* Environmental processes in the territory of Kabardino-Balkaria. Moscow—Nal'chik: RAS, 2004: 438 p. [In Russian].
5. *Burmester H.* Rezent-glaziale Untersuchungen und photogrammetrische Aufnahmen im Baksanquellgebiet (Kaukasus). *Zeitschrift für Gletscherkunde*. 1913, 8 (1): 1–41.
6. *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 during the 19th – 20th centuries. Pyatigorsk: North Caucasian publishing house MIL, 2008: 330 p. [In Russian].
7. *Oledenenie El'brusa.* Elbrus glaciations / Ed. G.K. Tushinskiy. Moscow: MSU, 1968: 345 p. [In Russian].
8. *Zolotarev E.A.* *Evolyuciya oledeneniya El'brusa.* Evolution of Elbrus glaciations. Moscow: Nauchnyi Mir, 2009: 238 p. [In Russian].
9. *Turmanina V.I.* Studies of the evolution of the Dzhankuat Glacier by phytoindication methods. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy.* Data of Glaciological Studies. 1971, 18: 106–109. [In Russian].
10. *Solomina O.N., Dolgova E.A., Maksimova O.E.* *Rekonstrukciya gidrometeorologicheskikh uslovij poslednih stoletij na Severnom Kavkaze, Krymu i Tyan'-Shane po dendrokhronologicheskim dannym.* Reconstruction of hydrometeorological conditions of the last centuries in the North Caucasus,

11. Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В., Круглов В.Б., Мазепа В.С., Наурзбаев М.М., Хантемиров Р.М. Методы дендрохронологии. Ч. I. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации. Красноярск: КрасГу, 2000. 80 с.
12. Holmes R.L. Computer-Assisted Quality Control in Tree-Ring Dating and Measurement // *Tree-Ring Bulletin*. 1983. V. 44. С. 69–75.
13. Solomina O., Bushueva I., Dolgova E., Jomelli V., Alexandrin M., Mikhalenko V., Matskovskiy V. Glacier variations in the Northern Caucasus compared to climatic reconstructions over the past millennium // *Global and Planetary Change*. 2016b. T. 140. С. 28–58. doi: 10.1016/j.gloplacha.2016.02.008.
14. Shean D., Alexandrov O., Moratto Z., Smith B., Joughin I., Porter C., Morin P. An automated, open-source pipeline for mass production of digital elevation models (DEMs) from very-high-resolution commercial stereo satellite imagery // *ISPRS Journ. of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2016. V. 116. С. 101–117. 10.1016/j.isprsjprs.2016.03.012.
15. Динник Н.Я. Горы и ущелья Терской области // *Изв. Кавказского отделения РГО*. 1884. Т. XIII. № 1. С. 1–48.
16. Россиков К.Н. Состояние ледников Северного склона Центрального Кавказа. Отчет за 1893 и 1894 гг. // *Зап. Кавказского отдела РГО*. 1896. Кн. 18. С. 279–322.
17. Володичева Н.А. Гляциогеографический мониторинг ледникового комплекса Азау (южный склон Эльбруса). // *Материалы Междунар. науч. конф. «Природные риски: анализ, оценка, картографирование»*. М.: Изд-во МГУ, 2013. С. 66–74.
18. Лабутина И.А. Общегеографические карты оледенения в Атласе ледников Эльбруса // *МГИ*. 1968. Вып. 13. С. 173–176.
19. Долгова Е.А., Соломина О.Н., Жомелли В., Юдина Ю.О., Олейников А.Д., Володичева Н.А. Дендрохронологическое датирование морен ледников Большой Азау, Шхельда и Терскол, долина р. Баксан, Приэльбрусье // *Новые методы в дендрэкологии: Материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участием (Иркутск, 10–13 сентября 2007 г.)*. Иркутск, 2007. С. 87–89.
20. Domínguez-Delmás M. Seeing the forest for the trees: New approaches and challenges for dendroarchaeology in the 21st century // *Dendrochronologia*. 2020. V. 62. 125731. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125731>.
21. Соломина О.Н., Володичева Н.А., Володичева Н.Н., Кудерина Т.М. Динамика нивально-гляциогенных ледников в Крыму, на Кавказе, в Crimea and Tien Shan according to dendrochronological data. Moscow–St. Petersburg: Nestor–Istoria, 2012: 232 p. [In Russian].
11. Shiyatov S.G., Vaganov E.A., Kirryanov A.V., Kruglov V.B., Mazepa V.S., Naurzbaev M.M., Hantemirov R.M. *Metody dendrokhronologii. Ch. I. Osnovy dendrokhronologii. Sbor i poluchenie drevesno-kol'cevoj informacii: uchebnoe posobie*. Methods of dendrochronology. Part I. Fundamentals of Dendrochronology. Collecting and receiving tree-ring information: a training manual. Krasnoyarsk: KrasGU, 2000: 80 p. [In Russian].
12. Holmes R.L. Computer-Assisted Quality Control in Tree-Ring Dating and Measurement. *Tree-Ring Bulletin*. 1983, 44: 69–75.
13. Solomina O., Bushueva I., Dolgova E., Jomelli V., Alexandrin M., Mikhalenko V., Matskovskiy V. Glacier variations in the Northern Caucasus compared to climatic reconstructions over the past millennium. *Global and Planetary Change*. 2016b, 140: 28–58. doi: 10.1016/j.gloplacha.2016.02.008.
14. Shean D., Alexandrov O., Moratto Z., Smith B., Joughin I., Porter C., Morin P. An automated, open-source pipeline for mass production of digital elevation models (DEMs) from very-high-resolution commercial stereo satellite imagery. *ISPRS Journ. of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2016, 116: 101–117. 10.1016/j.isprsjprs.2016.03.012.
15. Dinnik N.J. Mountains and gorges of the Terek region. *Izvestiya Kavkazskogo otdeleniya Russkogo Geograficheskogo Obshchestva*. News of the Caucasian branch of the Russian Geographical Society. 1884, XIII (1): 1–48. [In Russian].
16. Rossikov K.N. Condition of the glaciers of the Northern slope of the Central Caucasus. Report for 1893 and 1894. *Zapiski Kavkazskogo otdela RGO*. Notes of Caucasus branch of Russian Geogr. Society. 1896, 18: 279–322. [In Russian].
17. Volodicheva N.A. Glaciogeomorphological monitoring of the Azau Glacier complex (southern slope of Elbrus). *Materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. «Prirodnye riski: analiz, ocenka, kartografirovanie»*. Data of the International Scientific Conference. «Environmental risks: analysis, assessment, mapping». Moscow: MSU, 2013: 66–74. [In Russian].
18. Labutina I.A. General geographic maps of glaciers in the Atlas of Elbrus glaciers *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1968, 13: 173–176. [In Russian].
19. Dolgova E.A., Solomina O.N., Jomelli V., Udina Yu.O., Oleinikov A.D., Volodicheva N.A. Dendrochronological dating of Bolshoi Azau, Shkhelda and Terskol glaciers' moraines, Bak-san valley, Prielbrusie. *Novye metody v dendroekologii: materialy Vserossijskoj nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem (Irkutsk, 10–13 sentyabrya 2007 g.)*. New methods in dendroecology: materials of the All-Russian scientific conference with international participation (Irkutsk, September 10–13, 2007). Irkutsk, 2007: 87–89. [In Russian].
20. Domínguez-Delmás M. Seeing the forest for the trees: New approaches and challenges for dendroarchaeology in the 21st century. *Dendrochronologia*. 2020, 62: 125731. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125731>.

- циальных склоновых процессов в бассейнах рек Баксан и Теберда по данным радиоуглеродного датирования погребённых почв // Лёд и Снег. 2013. Т. 53. № 1. С. 118–126.
22. Золотарев Е.А., Сейнова И.Б. О пространственном положении и колебаниях ледника Большой Азау в последние столетия // МГИ. 1983. № 46. С. 156–163.
23. Dolgova E.A. June–September temperature reconstruction in the Northern Caucasus based on blue intensity data // *Dendrochronologia*. 2016. V. 39. С. 17–23.
24. Le Roy M., Nicolussi K., Deline P., Astrade L., Edouard J.L., Miramont C., Arnaud F. Calendar-dated glacier variations in the western European Alps during the Neoglacial: the Mer de Glace record, Mont Blanc massif // *Quaternary Science Reviews*. 2015. V. 108. С. 1–22.
21. Solomina O.N., Volodicheva N.A., Volodicheva N.N., Kuderina T.V. Dynamics of nival and glacial slope processes in the Baksan and Teberda river basins from radiocarbon dating of buried soils. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2013, 53 (1): 118–126. [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2013-1-118-126>.
22. Zolotarev E.A., Seinova I.B. The spatial position and fluctuations of the Bolshoi Azau glacier in recent centuries. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1983, 46: 156–163. [In Russian].
23. Dolgova E.A. June–September temperature reconstruction in the Northern Caucasus based on blue intensity data. *Dendrochronologia*. 2016, 39: 17–23.
24. Le Roy M., Nicolussi K., Deline P., Astrade L., Edouard J.L., Miramont C., Arnaud F. Calendar-dated glacier variations in the western European Alps during the Neoglacial: the Mer de Glace record, Mont Blanc massif. *Quaternary Science Reviews*. 2015, 108: 1–22.