

Палеогляциология

УДК 551.324.6 (1-925.15)

DOI: 10.31857/S2076673422030140, EDN: EQQZIC

Абсолютный и относительный возраст морен стадий Актру и Историческая ледников Центрального Алтая по данным лишенометрии и дендрохронологии

© 2022 г. А.Н. Назаров^{1*}, О.Н. Соломина^{2,1}, В.С. Мыглан¹¹Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия; ²Институт географии РАН, Москва, Россия
*nazar_69@mail.ru

Absolute and relative age of moraines of the Aktru and Historical stages of glaciers of Central Altai based on lichenometry and dendrochronology

A.N. Nazarov^{1*}, O.N. Solomina^{2,1}, V.S. Myglan¹¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia; ^{2,1}Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
*nazar_69@mail.ru

Received November 23, 2021 / Revised May 31, 2022 / Accepted July 11, 2022

Keywords: *Altai, glacier fluctuations, moraines, tree rings, lichenometry, dendrochronology, Little Ice Age, Late Holocene.*

Summary

Dendrochronology, and lichenometry were used to determine the relative and absolute age of the Late Holocene moraines of the glaciers of the Aktru, Maashei and Shavla valleys (North Chuya ridge, Central Altai). An array of 86 dendrochronological dates, related to moraine deposits, is analyzed, 30 of which are published for the first time. Also, for the first time, data on the relative (lichenometric) age of the young deposits of the Aktru Valley, and data on the lichenometry of the moraines of the Maashey glacier and one of the glaciers of the Shavly valley were obtained. We used the capabilities of each method and the expediency of their combined use in the study area. It was confirmed that the growth rates of lichens on the moraines of the Aktru stage (XVIII–XIX centuries) are generally consistent with the previously published estimates. The moraines of the Historical stage, which date earlier than 1700–2300 years ago, supports the lichens as large as 120–160 mm, but the scattering of their diameters is too large and the assessment of the lichenometric ages of these moraines seems to be problematic, but not completely excluded. The Akkem stage of glacier advance according to the recent publications dates back to the Late Glacial or Early Holocene time; the lichenometry is obviously not applicable at such ancient surfaces. According to dendrochronological dating, the glaciers of the North Chuisky Ridge in the last millennium advanced at least twice up to their maximum extent in the XVII – early XIX and XII centuries. In the 8th century, the sizes of the glaciers possibly, approached modern ones. After the XVII century, the cedar (*Pinus Sibirica*) in Central Altai significantly reduced its distribution area due to the climate cooling, retreating from the periglacial territories, where it was distributed earlier. All trees that grew near the glaciers, above 2300 m, died. The comparison of the dates of glacier advances in the past millennia with the tree-ring, ice-core, and palynological reconstructions of summer temperature and precipitation show a good correspondence.

Citation: Nazarov A.N., Solomina O.N., Myglan V.S. Absolute and relative age of moraines of the Aktru and Historical stages of glaciers of Central Altai based on lichenometry and dendrochronology. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2022, 62 (3): 387–409. [In Russian].
doi: 10.31857/S2076673422030140, edn: eqqzic.

Поступила 23 ноября 2021 г. / После доработки 31 мая 2022 г. / Принята к печати 11 июля 2022 г.

Ключевые слова: *Алтай, колебания ледников, морены, годовичные кольца, лишенометрия, дендрохронология, малый ледниковый период, поздний голоцен.*

Методы дендрохронологии и лишенометрии применены для определения относительного и абсолютного возраста позднеголоценовых морен ледников Центрального Алтая (Северо-Чуйский хребет). Установлено, что скорости роста лишайников – индикаторов на моренах стадии Актру – в целом согласуются с опубликованными ранее оценками. По данным дендрохронологического датирования, ледники этого района в последнем тысячелетии имели два максимума наступания: в XII в. и в XVII – начале XIX вв. (максимум продвижения). В VIII в. площадь ледников приближалась к современной. Размеры лишайников подрода *Rizocarpon* на моренах стадии Актру варьируют от 20 до 41 мм, на моренах Исторической стадии – от 120 до 160 мм, что в спорных случаях позволяет однозначно идентифицировать морену.

Введение

К одному из основных и надёжных методов определения времени наступания ледников относится радиоуглеродное датирование, широко

ко применяемое и для изучения ледников Алтая (Agatova et al., 2012; 2021). Тем не менее, несмотря на длительную историю исследований, возраст даже наиболее молодых морен Алтая (стадия Актру) определён очень приближённо.

Основываясь на данных радиоуглеродного датирования, можно уверенно констатировать, что это наступание происходило в среднем – позднем средневековье. Существует большая неопределённость, вызываемая не столько погрешностью датирования, сколько характером образцов и интерпретацией условий их залегания, даже если речь идёт о древесине. Применительно к Алтаю эти проблемы, включая противоречие между радиоуглеродными и дендрохронологическими датировками, подробно рассмотрены в работе (Назаров и др., 2016).

Об активности ледников ранее 1000 лет назад (л.н.) до сих пор можно судить только по находкам разрозненных древесных остатков на их предполях, многие из которых датированы с помощью дендрохронологии (Назаров, Мыглан, 2012). Источник дополнительной информации о возрасте морен – лишенометрия. Преимущества сочетания этого метода с радиоуглеродным датированием и дендрохронологией показаны во многих исследованиях (Villalba et al., 1990; Luckman, 2000; Barclay et al., 2009). Подобный подход позволяет провести верификацию результата и представить итоговую картину более

объёмной и менее фрагментарной. Пробелы в реконструкциях, вызванные недостатками и ограничениями одного из методов, компенсируются возможностями другого.

Задачи работы – определение абсолютного возраста наиболее молодых морен ледников Центрального Алтая (стадия Актру) путём обобщения всех прямых и косвенных дат, имеющих отношение к колебаниям ледников в средние века, и относительного возраста морен исторической стадии, а также выявление возможностей совместного использования лишенометрии и дендрохронологии в Центральном Алтае.

Район исследований

Работы проводили в Центральном Алтае, в пределах Северо-Чуйского хребта, в долинах северной и северо-восточной экспозиций на моренах ледников Большой Актру, Маашей и одного из ледников бассейна р. Шавла (рис. 1). В долине Актру дополнительно обследовали борта, пойму реки и фронтальную часть Аккемской морены в зоне развитого леса, где сохранились её фраг-

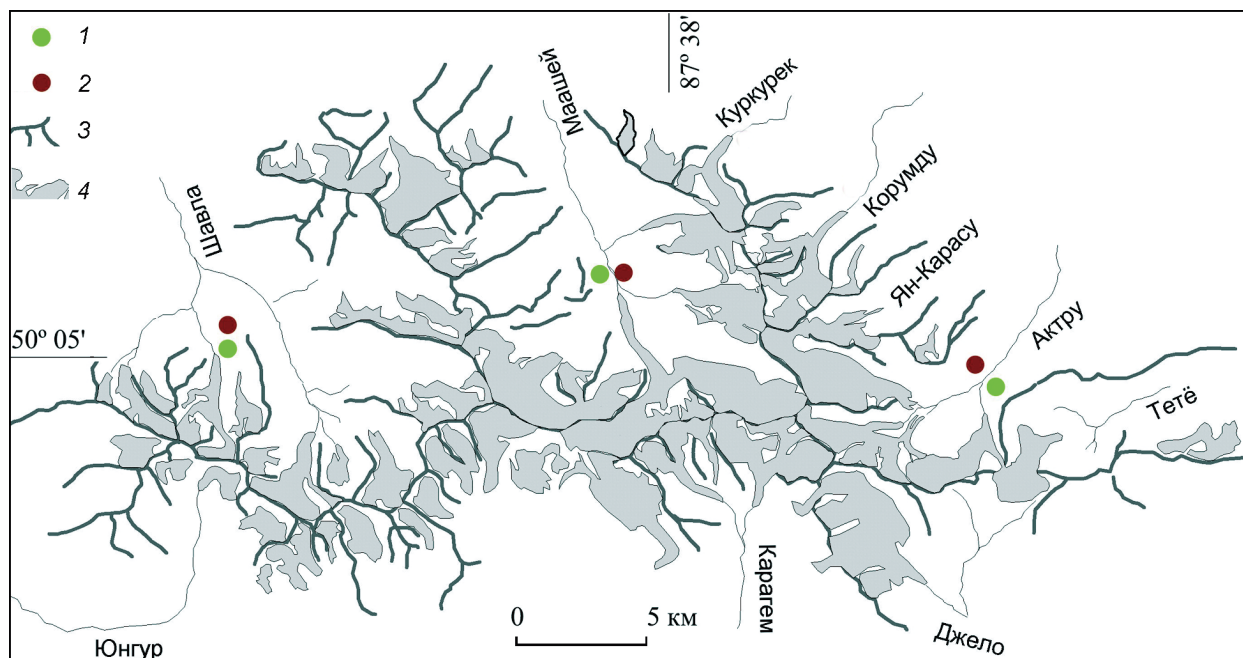


Рис. 1. Схема Северо-Чуйского хребта:

1 – места проведения лишенометрии; 2 – места отбора образцов для дендрохронологии; 3 – осевые части отрогов хребта; 4 – современное оледенение

Fig. 1. North Chui ridge:

1 – lichenometry sites; 2 – sampling sites for dendrochronology; 3 – axial parts of the spurs of the ridge; 4 – modern glaciation

менты, ещё не покрытые мхом и дёрном. Характеристики климата, рельефа, состояние и изменчивость верхней границы леса подробно рассматривались ранее (Галахов, Мухаметов, 1990; Назаров и др., 2016). Алтай-Саянская горная страна, в которую входит Центральный Алтай, находится в области с резко континентальным климатом, для которого характерны значительные суточные, сезонные и годовые колебания климатических характеристик, резкая дифференциация осадков на наветренных и подветренных склонах и, как следствие, различия в площади оледенения. В сочетании с разницей в количестве солнечной радиации всё это приводит к асимметрии в строении как склонов долин, так и макросклонов хребтов, которая выражена тем сильнее, чем выше хребет и более разработана долина.

Многие крупные ледники в период недавнего похолодания вторгались непосредственно в зону взрослого леса вплоть до высот 2200–1950 м. Их предполья после сокращения оледенения с середины XIX в. с большим или меньшим успехом осваиваются в настоящее время двумя лесообразующими породами: *Pinus sibirica* Du Tour и *Larix sibirica* Ledeb (кедр сибирский и лиственница сибирская). Верхняя граница сомкнутого древостоя сложной прерывистой линией поднимается до высот 2220–2350 м. При благоприятных условиях подрост занимает отметки до 2500 м. Наличие внутригорных котловин с дефицитом увлажнения обуславливает существование нижней границы леса, которая сменяется непосредственно степью или засушливой степью, а в более высокогорных районах (2200 м, Джулукульская котловина) граничит даже с горной тундрой.

Материалы и методы

В настоящей работе дендрохронологические исследования ограничены анализом образцов из местообитаний в пределах молодых морен (стадия Актру) и непосредственно перед ними (морена Исторической стадии). Вопросы, проблемы и перспективы применения дендрохронологии в палеогеографических реконструкциях подробно изложены ранее в работах (Назаров, Мыглан, 2012; 2013; Назаров и др., 2016). Датирование кедра проводилось по хронологии Актру

(Назаров, Мыглан, 2013), лиственницы — по хронологии Монгун (Мыглан и др., 2008). При дендрохронологическом анализе применялись стандартные процедуры предварительной обработки, измерений и кросс-корреляционного анализа (Cook, Kairiukstis, 1990). Измерения ширины годовичных колец выполнены на полуавтоматической установке LINTAB (с точностью 0,01 мм). Серии датировались путём сочетания графической перекрёстной датировки и кросс-корреляционного анализа (в пакете программ DPL (Holmes, 1983) и TSAP V3.5 (Rinn, 1996).

С начала применения лихенометрического метода опубликовано множество работ, в том числе обзорных, освещающих его методические аспекты, однако до настоящего времени нет единого протокола лихенометрических исследований. Так, количество лишайников — индикаторов возраста — различается у разных авторов от одного максимального до среднего из пяти или десяти измерений. Другие исследователи используют частотные диаграммы размеров, основанные на выборках из сотен особей. По мнению J. Innes (1985), измерения надо проводить на всей площади поверхности морены, тогда как Locke et al. (1979) полагают, что сравнимые результаты могут быть получены только, если используются обширные площади одинаковых размеров. Острая дискуссия ведётся вокруг кривой распределения размеров максимальных лишайников, которая может иметь разную форму. Более того, распределения могут отличаться для популяции реперных поверхностей и датировемых, возраст которых не известен. Для избежания этого противоречия одни авторы применяют байесовское распределение максимальных диаметров (Jomelli et al., 2007), а другие считают, что внедрение таких сложных статистических методов нецелесообразно для весьма приблизительной оценки возраста, которую может обеспечить лихенометрия (Bradwell, 2009). Оценка ошибок датирования, включая статистические, — предмет для дискуссий. Некоторые исследователи принимают ошибку лихенометрического датирования в $\pm 20\%$, однако для этого нет никаких специальных оснований. Более узкий доверительный интервал получается при использовании теории экстремальных значений (Jomelli et al., 2007).

Относительно недавно лихенометрический метод подвергся жёсткой критике в статье

(Osborn et al., 2015), озаглавленной «Лихенометрическое датирование: наука или псевдонаука?», где авторы указали на основные источники ошибок. В частности, справедливо подвергается критике предположение, что самые крупные лишайники колонизируют поверхность вскоре после её формирования и сохраняются бесконечно долго. Исследования смертности лишайников наглядно подтверждают этот тезис. Авторы работы (Trenbith, Matthews, 2010) в течение 19 лет наблюдали за лишайниками на 46 моренах 17 ледников в Норвегии и установили, что скорость вымирания колеблется от 0,38 до 5,09% в год. Популяции корковых лишайников погибают от разных причин — абразии, длительно-го снежного покрова, загрязнений и т.п., следовательно, вероятность найти на поверхности самый первый лишайник-колонизатор существенно уменьшается со временем. Неопределённость вносит и конкуренция между особями одного или разных видов.

Использование кривых роста, построенных на основе независимо датированных поверхностей, также проблематично, особенно при их экстраполяции далеко за пределы реперных точек. Реперные поверхности имеют природу и площадь, существенно отличные от датировемых. Виды лишайников, часто неразличимые в полевых условиях, имеют разную скорость развития, со временем меняются и условия среды. Поскольку форма кривых роста до сих пор изучена слабо, их экстраполяция также имеет чрезвычайно неопределённый характер. Часто оценки возраста, проведённые разными исследователями, не воспроизводятся (Trenbith, Matthews, 2010), хотя, например, Булл и Брендон (Bull, Brandon, 1998), показывают удовлетворительные результаты повторных измерений. Авторы статьи признают, что при соблюдении определённых правил и максимально подробном документировании лихенометрических работ метод может дать удовлетворительные оценки относительного и абсолютного возраста поверхностей. Появившиеся в последнее время в изобилии даты морен по космогенным изотопам позволяют проверить качество лихенометрического датирования. Несколько положительных примеров описано, в частности, в работе (Young et al., 2009) для Аляски.

Лихенометрические исследования на Алтае для абсолютного датирования ледниковых от-

ложений носят эпизодический характер. Как и в других районах, исследователи используют подрод *Rhizocarpon* в целом, поскольку различить отдельные виды в полевых условиях очень трудно. Для построения первой кривой роста О.Н. Соломина (1999) использовала 14 реперных поверхностей: морены ледников Большой Актру, Малый Актру, Корумду и Софийский, а также могильники долины р. Джазатор. Позже лихенометрия повторно проводилась на моренах Актру (Галахов и др., 2005) и на археологических объектах (Давыдов, Быков, 2013). Из-за разнообразия экологических условий горной части Русского Алтая (от засушливой степи до горной тундры) авторы последней работы постепенно отказались от оценки возраста по максимальному диаметру и разрабатывают подход, основанный на оценке проективного покрытия групп видов лишайников с разной «конкурентной силой» или «агрессивностью». По мнению авторов, основная проблема лихенометрии морен — отсутствие надёжных хронологических реперов для калибровки кривой роста. Это тем более удивительно, что с момента первых попыток построения таких кривых (1980–90-е годы) обнаружены десятки дендрохронологических и радиоуглеродных дат из моренных отложений. Однако при сложном строении разновозрастных моренных валов, объединённых в один комплекс и налегающих друг на друга, определить соответствие возраста определённой поверхности трудно, а иногда и невозможно.

На рис. 2 представлены доступные на сегодня реперные точки кривых роста лишайников для кавказских ледников (Solomina et al., 2016) и Алтая (Соломина, 1999; Галахов и др., 2005). Аппроксимирующая функция для Алтая, показанная на рис. 2, рассчитана без учёта точек, возраст которых вызывает сомнение. Алтайские реперные точки определены с небольшим разбросом на прямой в интервале времени до 170–200 л.н. Добавление новых точек, предложенных для морен Исторической (136 мм для интервала 2000 ± 300 л.н.) и Аккемской стадий (264 мм для поверхности возраста 4550 ± 350 л.н.) (Галахов и др., 2005), с учётом прежних данных по могильникам Джазатора (125 мм для интервала 440–480 гг. до н.э.) (Соломина, 1999), открывает новые возможности для датирования древних поверхностей, но в то же время добавляет слиш-

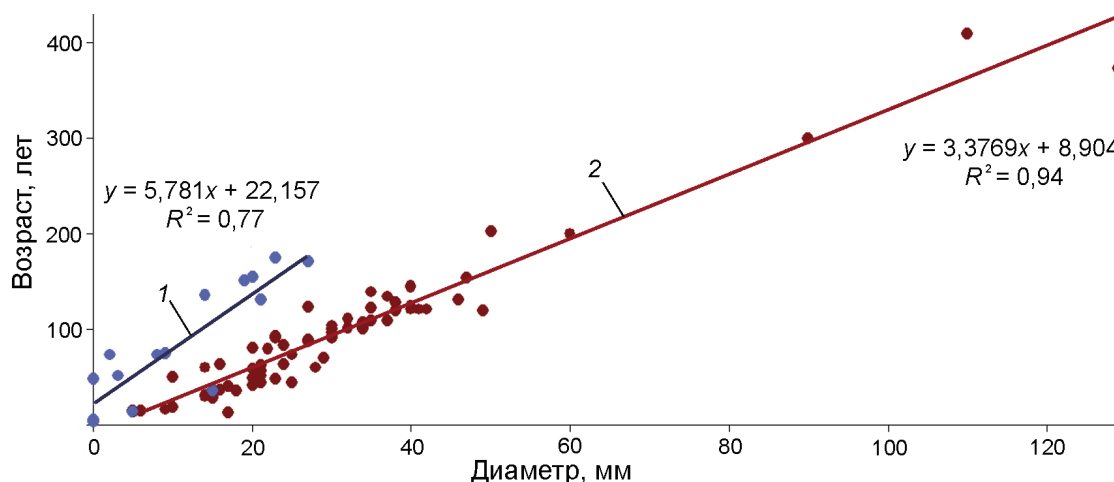


Рис. 2. Линейная аппроксимация реперных точек, оценивающих скорость роста лишайников подрода *Rhizocarpon*:

1 – территория Алтая (Соломина, 1999; Галахов и др., 2005); 2 – территория Центрального Кавказа (Solomina, 2016)

Fig. 2. Linear approximation of reference points estimating the growth rate of lichens of the *Rhizocarpon* subgenus:

1 – located of Altai (Соломина, 1999; Галахов и др., 2005); 2 – located of Central Caucasus (Solomina, 2016)

ком много неопределённостей, связанных как с их малым количеством, так и с погрешностью предполагаемого возраста морен. По этой причине для оценки кривой роста лишайников на Кавказе отказались от использования поверхностей старше одного тысячелетия (Solomina et al., 2016). На Алтае возраст трёх, наиболее древних реперных точек, полученных на моренах Исторической и Аккемской стадий, также не может считаться достоверно определённым. В частности, морена Аккемской стадии, вопреки прежним предположениям (Agatova et al., 2012), связана с эпизодом наступания ледников в раннем голоцене (Галахов и др., 2018) или в позднеледниковье (Agatova et al., 2021.).

Среди русскоязычных работ, посвящённых развитию лихенометрии и её применению, наиболее актуальной остаётся работа А.А. Галанина (2002), которая и послужила основой для проведения полевых исследований и обработки данных, представленных далее. Максимальный диаметр лишайников в данном случае вычисляется как свободный член в уравнении регрессии типа

$$y = a \lg_x b,$$

где y – диаметр слоевища; x – его порядковый номер; a и b – коэффициенты.

Настоящее выражение позволяет получить расчётный максимум диаметра таллома на данной поверхности при наличии достаточной ста-

тистической выборки и теоретически избежать неточностей в его оценке, особенно на древних поверхностях, возраст которых близок к пределу жизни вида-индикатора. Несмотря на массу отмеченных недостатков, сильной стороной метода остаётся возможность относительного датирования отложений и форм рельефа в приледниковье. Именно с этой целью мы и используем лихенометрию в нашей работе для решения задачи ранжирования моренных комплексов и их фрагментов в долинах Северо-Чуйского хребта. Наиболее универсальный и надёжный индикатор времени экспонирования поверхности в приледниковье Алтая – лишайники подрода *Rhizocarpon* (Соломина, 1999), которые представлены следующими видами: *Rhizocarpon eutetracoides* (Nyl.) Blomb. et Forssell, *Rhizocarpon geographicum* (L.) DC, *Rhizocarpon saanaense* Rasanen, *Rhizocarpon alpicola* (определение выполнено Е.В. Давыдовым в Алтайском государственном университете, 2009 г.).

Единицей осмотра, для которой рассчитывался один максимальный диаметр, служили формы рельефа единого генезиса (морены, подножия осыпей, стабильные части каменных глетчеров и т.п.), полигенетические объекты рассматривались отдельно. Исключены из рассмотрения участки, поверхность на которых подвергается постоянному омолаживанию: участки с камнепадами, лавинные конуса, участ-

ки с образованием (деградацией) погребённого льда, с просадками суффозионной природы, крутые бровки морен и т.п. На единичной осматриваемой поверхности измерения проводили с точностью $\pm 0,5$ мм в произвольном порядке до достижения необходимого для построения аппроксимирующей функции количества (не менее 300 измерений). Площади осматриваемых форм рельефа были различны и составляли от нескольких сотен до нескольких тысяч квадратных метров, но, даже несмотря на это, в некоторых случаях размер выборки был менее рекомендуемого.

Результаты исследований

Долина Актру. Измерение лишайников на молодой морене стадии Актру проводилось для ледника Большой Актру в диапазоне абсолютных высот 2380–2420 м отдельно для левой и правой частей фронта (рис. 3, табл. 1). В правобережье морены на наиболее стабильной поверхности выборка была достаточна (308 измерений), поэтому расчётный максимум диаметра совпадает с максимальным измеренным. По левому фронту морены, напротив, поверхность гораздо менее стабильна, выборка статистически не достоверна (67 измерений) и отражает не возраст поверхности, а только период её стабильного состояния.

Фрагмент морены Исторической стадии (см. рис. 3, III) протягивается от подножия горы Караташ (3535 м), где он перекрыт свежими осыпями, до места срезания его боковой мореной Малого Актру (см. рис. 3, II). Сохранившаяся её часть имеет ширину около 160 м. На морене нет растущих деревьев значительного возраста, но встречаются их остатки с диаметром стволов в несколько десятков сантиметров. Большая часть поверхности сложена крупноглыбовым материалом, состоящим в основном из метаморфических сланцев. Порода выветривается очень неравномерно, что ограничивает рост эпилитных лишайников (см. рис. 3, Б). О действии этого фактора на древних поверхностях упоминает и А.А. Галанин (2002). Наполненность выборки лишайников на Исторической морене Большого Актру близка к максимальной (192 измерения), но всё же недостаточна, несмотря на то,

что площадь морены весьма велика (см. табл. 1). С левой стороны морена обрывается в сторону р. Актру резким уступом высотой 20–30 м, протягивающимся по всей её ширине. Между уступом и рекой находится субгоризонтальный участок шириной 130–140 м, заселённый лиственницей и кедром значительного возраста (более 200 лет), так называемая «кедровая площадка» (см. рис. 3, А, I). Этот участок леса между ледниками Большой и Малый Актру сохранился и во время их активизации в стадию Актру.

Результаты измерения лишайников, проведённые на наиболее древних поверхностях в зоне леса на сохранившихся фрагментах морены Аккемской стадии, показывают меньший диаметр, чем в верховьях долины (см. табл. 1). Морена замыкает широкую и открытую часть поймы и находится в зоне леса на высоте около 2050 м и ниже. Внешняя граница дистальной части морены точно не известна. Расчётный диаметр отражает, вероятнее всего, возраст не первого, а лишь очередного поколения лишайников и является максимально возможным в данных условиях (экологические условия роста, свойства породы и размер глыб). Дендрохронологические исследования на моренах Актру выполнялись нами и ранее (Назаров, Мыглан, 2012; Назаров и др., 2016). В настоящей работе все данные показаны на одном рисунке, в который добавлены и новые материалы, позволяющие конкретизировать состояние ледников в определённые моменты времени (рис. 4, табл. 2). Датирование лиственниц из правой части фронта Малого Актру (1625–1785 и 1544–1794 гг.) проведено в работе М.Ф. Адаменко и А.А. Сюбаева (1977). Авторы рекомендуют прибавить к конечной дате ещё 30 лет на величину заболони. Эти даты приводятся и в монографии П.А. Окишева (1982). Крайнее правое дерево позднее датировано Н.И. Быковым (2002), который приводит две даты (последние кольца 1779 и 1780 гг.). Позже мы уточнили и эту дату (Назаров и др., 2016) (см. рис. 4).

Исследования показывают, что ни одно из деревьев, обнаруженных перед Большим Актру, не пережило рубеж XVII–XVIII вв. (см. рис. 4, в). Такое же заключение можно сделать и о периметре основного языка Малого Актру (см. рис. 4, б, г). В правой части морены деревья погибли на столетие позже (см. рис. 4, д и даты

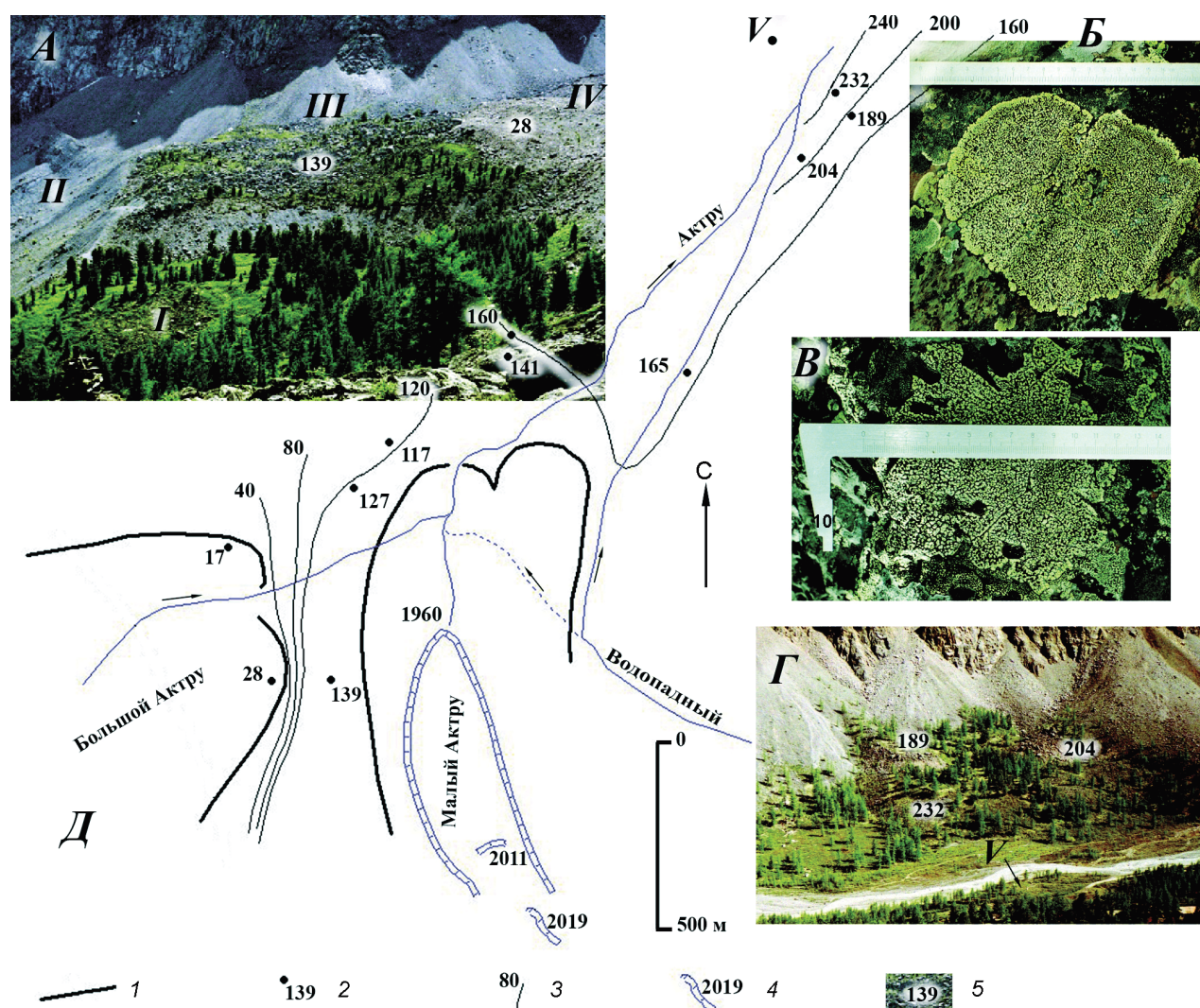


Рис. 3. Изолинии максимального диаметра лишайников подрода *Rizocarpon* в верхней части долины Актру и места измерений:

A – фрагмент морены Исторической стадии между ледниками Большой и Малый Актру, фото с левого борта долины: *I* – «кедровая площадка»; *II* – левый край трого ледника Малый Актру; *III* – стабильный и незалесённый участок морены Исторической стадии; *IV* – правая часть молодой морены Большого Актру (стадия Актру); *Б* – лишайник диаметром 190 мм; правая часть таллома выкрашивается вместе с частицами породы; *В* – лишайник на глыбе породы с очень неравномерным выветриванием (морена Исторической стадии), по внешнему краю слоевища – пустоты; *Г* – наиболее древний и стабильный участок поверхности в данном районе, находящийся между лавинными и осыпными конусами; *Д* – масштабированная схема долины с указанием мест отбора и расчётным максимальным диаметром лишайников: *В* – положение метеостанции Актру (аналогично фото *Г*). *1* – моренный вал стадии Актру; *2* – места измерений и расчётный максимальный диаметр лишайников; *3* – изолинии диаметра лишайников; *4* – край чистого льда ледника Малый Актру в соответствующем году; *5* – максимальный диаметр лишайников на данных поверхностях

Fig. 3. The upper part of the Aktru Valley. Isolines of the maximum diameter of lichens of *Rizocarpon* subgenus and measurement locations:

A – fragment of moraine of Historical stage between glaciers Bolshoy and Maly Aktru, photos from the left side of the valley: *I* – «cedar playground»; *II* – the left edge of the trough of Maly Aktru glacier; *III* – stable and unforested part of moraine of Historical stage; *IV* – right side of the young moraine Bolshoy Aktru (stage Aktru); *B* – lichen, as large as 190 mm in diameter. The right part of the talom is crumbling together with the rock particles; *B* – lichen on a block of rock with very uneven weathering (Historical stage moraine), with caviats along the outer edge of the lichen; *G* – is the oldest and the most stable surface, located between avalanche and talus cones; *D* – scaled map of the valley with the locations of the sites and the estimated (modeled) maximum diameter of the lichens: *V* – the position of the Aktru weather station (similar to photo *G*). *1* – moraine ridge of the Aktru stage; *2* – the locations of the sites and the estimated (modeled) maximum diameter of the lichens; *3* – isolines diameter of the lichens; *4* – the position of the Maly Aktru glacier in 1960, 2011, and 2019, the edge of clean ice; *5* – the maximum diameter of lichens (modeled) on these surfaces, respectively

Таблица 1. Измеренные и расчётные диаметры лишайников подрода *Rhizocarpus* на моренах разного возраста*

Ледник	Название (часть) морены	Первые десять измеренных максимальных диаметров из выборки подрода <i>Rhizocarpus</i> , мм										Расчётный диаметр, мм	Число замеров	Абсолютная высота, м
Большой Актру	Актру, левая часть фронта	28	25	25	23	21	21	21	20	20	20	28	308	2400
	Актру, правая часть фронта	14	14	14	14	13	13	13	13	13	13	20	67	2400
Между Большим и Малым Актру	Историческая	117	109	108	108	108	106	104	102	102	100	139	192	2320
Актру	Аккемская, проксимальная часть	164	154	152	140	124	121	120	120	117	107	170	176	2050
	Аккемская, дистальная часть	182	178	162	154	153	150	145	136	131	125	189	122	2000
Маашей	Актру	37	35	34	34	33	33	30	30	30	29	41	205	2200
	Историческая	154	138	133	132	129	125	122	119	118	115	161	299	2200
Шавла	Старое русло	34	33	31	27	25	22	19	18	18	17	32	102	2140
	Внешняя морена	101	100	95	87	86	86	84	84	83	82	119	323	2160

*Измерения в долине Актру проводили в 2004–2005 гг., в долине Шавлы – в 2006 г.

по правой части фронта). Три кедра и три лиственницы в центральной части морены Малого Актру (см. рис. 4, а) погребены ледником во второй половине XII в., причём по его периметру лес продолжал расти. Все указанные деревья погибли или от близости ледника (см. рис. 4, в, д), или были непосредственно погребены подо льдом (см. рис. 4, а, г, фронт Малого Актру). Таким образом, кульминация стадии Актру в долине Актру наблюдалась в конце XVII – начале XVIII вв. Минимальный возраст морены Актру оценивается Л.Н. Ивановским и В.А. Паныхевым (1978) не позднее середины XIX в., когда ледник начал отступать от своей внешней морены и освободил пространство, достаточное для заселения древесной растительностью.

Анализ шести образцов субфоссиальной древесины, обнаруженных во внутренней части морены Малого Актру – образцы mal201 (758–1019 гг.), mal202 (729–855 гг.), mal203 (982–1137 гг.), mal204 (741–1143 гг.), а также A1901me (887–1170 гг.) и A1902me (1005–1180 гг.) (см. рис. 4, а; см. табл. 2) – показал, что они имеют близкие даты произрастания и гибели. Образцы mal201 и mal202 отличает, несмотря на их более древний возраст, хорошая сохранность. По нашим наблюдениям, погибшие и поваленные деревья в зоне сомкнутого древостоя и (или) при наличии кустарников, например, *Betula nana*, разлагаются быстро – на протяжении нескольких

десятков лет. Стволы небольшого диаметра (10–15 см) при этом исчезают почти полностью, от крупных остаются лишь внешние части. По этой причине хорошую сохранность обнаруженных фрагментов погибших деревьев (наличие сердцевины, большой диаметр ствола, полное отсутствие гнили, высокая плотность древесины) могли обеспечить только мёрзлые условия донной морены, т.е. указанные деревья скорее всего не подвергались длительному субаэральному выветриванию, а были перекрыты ледником вскоре после гибели или погибли непосредственно под его наступающим фронтом. У фрагментов кедров mal203 и mal204, найденных на поверхности, удалось датировать лишь внешние части. Ископаемые образцы A1901me и A1902me имеют лучшую сохранность, но также значительно подвержены гниению. С большой вероятностью все шесть деревьев были погребены почти одновременно. Таким образом, наступление ледника, предшествующее максимуму XVII – начала XIX в. сходного с ним, но несколько меньшего масштаба, мы относим к XII в. Образование правой части моренного комплекса Малого Актру очевидно следует связывать с концом XVIII – началом XIX в. (см. рис. 4, д; даты по фронту правой части).

Долина Маашей. Лихенометрия в долине Маашей проводилась в правой части морены стадии Актру и по подножию левого борта долины на участке морены Исторической стадии,

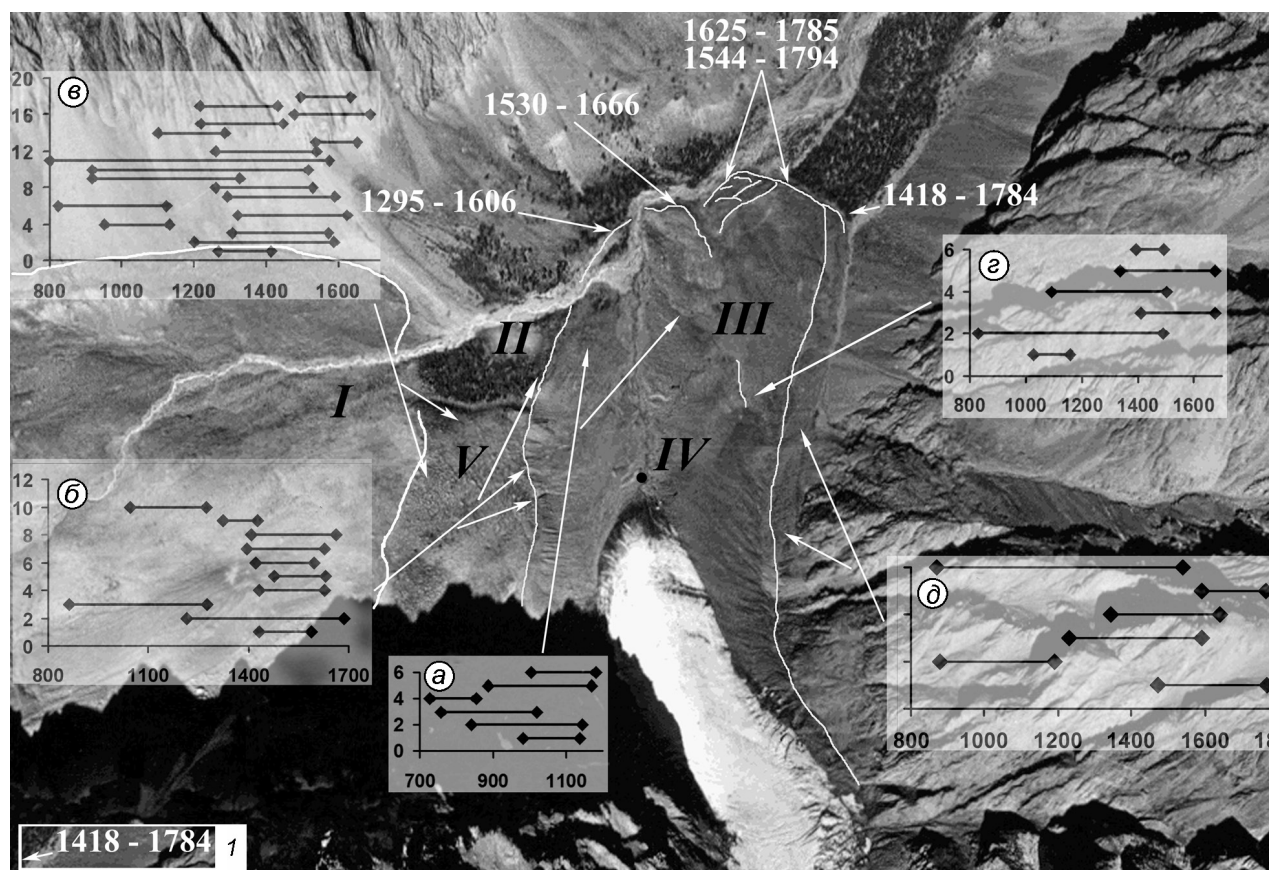


Рис. 4. Предполя ледников Большой и Малый Актру с указанием возраста и мест отбора образцов на дендрохронологический анализ:

I – возраст и местонахождение спилов древесных остатков; *I, III, V* – морены ледников: *I* – Большой Актру, *III* – Малый Актру, *V* – фрагмент морены Исторической стадии; *II* – кедровая площадка; *IV* – наиболее вероятное положение репера А.Н. Рудого (1976 г.). На врезках *a–д* (здесь и на рис. 5 и 6) – время жизни (ось *x*), количество (ось *y*) и местонахождение (стрелочки) погибших деревьев, прямые линии, ограниченные ромбами, – возраст спилов; *a* – погребённая древесина в центральной части ледника Малый Актру (перемещённая); *б* – остатки и фрагменты деревьев на морене Исторической стадии вблизи или на контакте с мореной Малого Актру, in situ; *в* – количество и возраст спилов на морене Исторической стадии перед молодой мореной ледника Большой Актру (in situ); *з* – находки ископаемой древесины во внутренней части морены в русле руч. Водопадный, смещение образцов минимально (10–50 м); *д* – спилы по подножию правой боковой морены; смещение образцов минимально (несколько метров). Единичные образцы по фронту морены имеют ископаемое происхождение (перемещённые), исключая образец in situ (1418–1784 гг.)

Fig. 4. Forefields of Bolshoi and Maly Aktru glaciers. The age and locations of sampling for dendrochronological analysis: *I* – the age and locations of sampling for dendrochronological analysis; *I, III, V* – Glacier moraines: *I* – Bolshoi Aktru, *III* – Maly Aktru, *V* – fragment of a moraine of the Historical stage; *II* – cedar playground; *IV* – is the most probable position of the A.N. Rudoy mark (1976 г.). Insets *a–д* (here and in similar Fig. 5 and 6 below) – lifetime (*x* axis); quantity (*y* axis) and location (arrow) of dead trees, straight lines bounded by rhombuses – the age of the cuts; *a* – in buried wood the central part of the Maly Aktru glacier (displaced); *б* – remains and fragments of trees on the moraine of the Historical stage, near or at the contact with the moraine of Maly Aktru, in situ; *в* – number and age of cuts on the moraine of the Historical stage in front of the young moraine of the Bolshoi Aktru glacier (in situ); *з* – finds of fossil wood in the inner part of the moraine, to the right of the main glacier, in the channel of the Vodopadny stream, the displacement of the samples is minimal (10–50 m); *д* – the number and age of cuts at the foot of the right lateral moraine; sample displacement is minimal (several meters). Single samples along the moraine front are of fossil origin (displaced), excluding the in situ sample of 1418–1784

находящейся на расстоянии около 800 м от молодой морены (рис. 5; см. табл. 1). Расчётный диаметр лишайников на молодой морене ледника Маашей в 1,5 раза больше такового на морене Большого Актру. Отчасти это можно объяснить

разницей по высоте (около 200 м), недостаточностью выборки, малой площадью обследованного участка; кроме того, часть лишайников может иметь унаследованный характер. Размер лишайников на Исторической морене, напро-

Таблица 2. Дендрохронологические даты на предпольях ледников Большой и Малый Актру*

Местоположение		Номер образца	Возраст спи- ла, гг. н.э.	Абсолютная высота, м	Примечания	Координаты, WGS 84, градусы
Фронт морены Малый Актру	Правая часть	ma0802	1418–1784	2199	Лиственница, первое кольцо, in situ	50,07445 87,77295
		—	1625–1785	2209	Лиственница Адаменко, Сю- баев, (1977), первое кольцо	—
		—	1544–1794	2209		—
	Цент- ральная (левая) часть	ma0803	1530–1666	2207	Разорванный ледником ствол кедра, погребённый	50,074820 87,768430
		mm1001	1285–1606	2215	Куски кедра в глыбах	50,074210 87,766823
Центральная часть море- ны Малого Актру, вблизи впадения ручья Водопад- ного в р. Малый Актру	а	ma1201	758–1019	2213	Ствол лиственницы около 160 см, разорван с торцов, первое кольцо, погребённый	50,072781 87,768144
		ma 1202	729–855	2215	Небольшой фрагмент ствола, кедр, первое кольцо, погребённый	50,072579 87,768776
		A1901me	887–1170	2209	Щепки и незначительные фрагменты ствола, лиственница, погребённые	50.0729240 87.7684240
ma 1203		982–1137	2215	Небольшой фрагмент ствола, кедр, на поверхности	50,072708 87,766187	
Левая внутренняя часть морены Малого Актру, осцилляционный вал		ma 1204	841–1143	2239	Приваленный и разорван- ный ствол кедра, на поверхности	50,072392 87,765706
		A1902me	1005–1180	2223	Незначительные фрагменты ствола, кедр, погребённые	50.0724930 87.7657230
Часть Исторической морены Большого Актру, в непосредственной близости от контакта с левой боковой мореной Малого Актру	б	BA1210	924 –1433	2336	Кедр	50,069013 87,763705
		BA 1211	1227–1623		Выпадает 1471 г., кедр	
		BA 1212	1327–1651		Выпадают 1371, 1422, 1495, 1577, 1581 гг., лиственница	
		BA 1213	1147–1579		Выпадают 1194, 1247, 1310, 1482 гг., пять колец на пери- оде 1485–1523 гг., травма зимой 1336 г., лиственница	
					Выпадают 1236, 1239, 1299 гг., кедр около 80 см в диаметре	
		BA 1215	936–1393		Выпадает 1495 г., лиственница	
		BA 1216	1092–1559		Выпадает 1524 г., кедр	
		BA 1217	1140–1629		Кедр	
		BA 1218	1405–1482		Выпадают 1391, 1450 гг., кедр	
		BA 1219	1508–1646		Выпадают 1282, 1314, 1339 гг., кедр	
		BA 1220	1119–1506		Контакт с мореной Малого Актру, кедр	
		BA 1221	1104–1581			
		BA 1222	877–1357			
Левая боковая морена Малого Актру.	в	ma1001	1432–1590	2300	Торчащие из-под валунов остатки кедра, контакт с кедровой площадкой, погребённое	50,071560 87,764500

Ледник Большой Актру. Правый берег, выше кедровой площадки, пространство перед молодой мореной	в	BA 1105	1266—1413	2372	Подножие морены, кедр	50,069990 87,761931
		BA 1106	1201—1587	2340	Погибший кедровый лес, 50—100 м от молодой морены	
		BA 1107	1305—1571			
		BA 1108	951—1131			
		BA 1110	1320—1624			
		BA 1111	822—1123			
		BA 1112	1293—1590			
		BA 1113	1258—1528	2315—2337	Подножие морены, кедр	50,070061 87,761437
		BA 1114	918—1325			50,070286 87,761416
		BA 1115	919—1516			
		BA 1201	800—1575		Небольшие кедровые деревья недалеко от молодой морены	50,070504 87,761486
		BA 1202	1260—1539			
		BA 1203	1537—1651		Кедр	50,070410 87,761900
		BA 1204	1101—1285	50,070554 87,762035		
		BA 1205	1217—1446			
		BA 1206	1478—1686			
		BA 1207	1216—1430			
		BA 1208	1496—1634	2352	50,070205 87,761577	
Правая лопасть морены Малого Актру, внутрен- няя часть, русло ручья Водопадного	г	Wf 0804	1028—1156	2218	Комлевая часть неправиль- ной формы, кедр	50,072260 87,770230
		Wf 0808	1410—1674	2263	Кедр, комлевая часть, стёрто, вероятно, не более 20 колец	50,071880 87,771770
		Wf 0901	1089—1501	2240	Кедр, фрагмент ствола	50,071550
		Wf 0902	1339—1674		Ветка кедра	87,771400
		a1716	828—1487	2226	Кедр, комлевая часть, часть внешних колец стёрта	50,071620 87,772190
		A1905me	1395—1491	2249	Щепка кедра	50,071226 87,770953
Подножие правой боко- вой морены, выше ручья Водопадного	д	a1709	1472—1769	2322	Первое кольцо, кедр	50,068910 87,771164
		a1710	879—1191		Не более 20 колец до центра, кедр	
		a1712	1230—1593	2315	In situ, сильная асимметрия прироста, первое кольцо, кедр	50,069140 87,771329
		a1713	1344—1640		Асимметрия прироста, первое кольцо, кедр	
		a1714	1592—1767		Первое кольцо, кедр	50,070170
		a1715	871—1539		Асимметрия прироста, кедр	87,771653

*Данные о возрасте образцов приведены без каких-либо поправок на потери внешних и внутренних колец: а, б, в, г, д соответствуют врезкам на рис. 4; на фронте морены Малого Актру все деревья — перемещённые, кроме образца ma0802; а, г — все деревья погребены и перемещены ледником; б, в — все деревья, кроме ma1001, — in situ; д — перемещение деревьев минимально или его нет. Там, где не указано специально, первое кольцо отсутствует. Подкорковые кольца отсутствуют у всех образцов. Расшифровка аббревиатуры образцов: буквы — название местообитания, две следующие цифры — год отбора, две последние — номер образца: например, a1715 — образец №15, 2017 г., долина Актру. Даты 2008–2012 гг. опубликованы ранее (Назаров и др., 2016).

тив, практически совпадает с измерениями в долине Актру (см. рис. 5; см. табл. 1), что определённо указывает на сходство скорости процессов

стабилизации и обновления поверхности и косвенно свидетельствует об одновременности её формирования в обоих долинах.

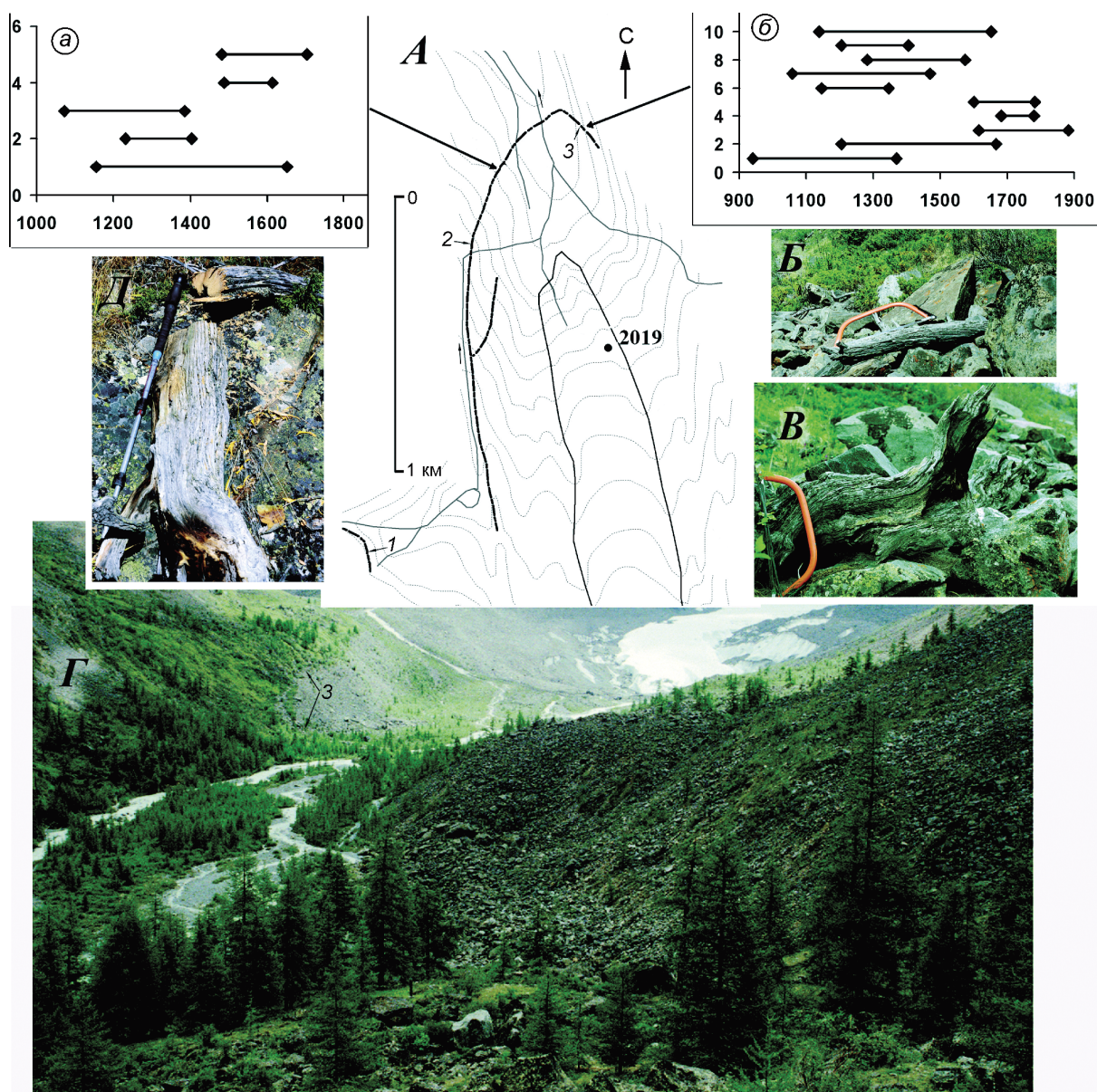


Рис. 5. Язык и предполя ледника Маашей, места отбора образцов на дендрохронологический анализ:

A – схема предполей: *1* – фронтальная часть моренного вала левого притока ледника Маашей; *2* – верхняя бровка молодого вала; *3* – место проведения лишенометрии на молодой морене (стадия Актру). 2019 – положение языка ледника в 2019 г.; *Б, В* – погибшие кедры на правой части фронта морены; *Г* – фото со второго вала морены Исторической стадии в направлении ледника; *Д* – погибший кедр в левой части фронта морены. Врезки: *a* – количество и возраст спилов по подножию левой и *б* – правой части морены

Fig. 5. Tongue and forefields of the Maashey glacier, sampling sites for dendrochronological analysis:

A – the scheme of the prepoles: *1* – frontal part of the moraine wall of the left tributary of the Maashey; *2* – upper edge of the young moraine of the Maashey glacier; *3* – location of lichenometry on a young moraine (Aktru stage). The distance between the moraines of neighboring glaciers is about 500 m. 2019 – the position of the glacier tongue in 2019; *Б, В* – dead cedars on the right side of the moraine front; *Г* – photo from the second wall of the moraine of the Historical stage in the direction of the glacier. Distance to the front of the young moraine is 800 m; *Д* – dead cedar on the left side of the front of the moraine. Insets: *a* – the number and *б* – age of cuts at the foot of the left and right parts of the moraine

Определение возраста погибших деревьев проводилось как в левой, так и в правой частях фронта молодой морены (см. рис. 5; табл. 3).

Фронт этой стадии слабо выражен в рельефе и отчётливо читается только по отсутствию растительности и то, главным образом, в право-

Таблица 3. Дендрохронологические даты, фронтальной части молодой морены ледника Маашей

Местоположение		Номер образца	Возраст спи- ла, гг. н.э.	Абсолютная высота, м	Примечания	Координаты, WGS 84, градусы
Левая часть фронта	a*	ma1606me	1155–1652	2209	Остатки кедра	50,109133 87,593533
		ma1607_1	1231–1404		Остатки лиственницы, in situ	
		ma1608me	1072–1385		Остатки кедра	
		ma1812_1	1487–1613	2205	Ствол лиственницы, in situ	50,108816 87,593216
		ma1813me	1482–1704	2169	Остатки лиственницы	50,109450 87,593667
Правая часть фронта	б	ma0908me	942–1370	2211	Кедр	50,109930 87,597910
		ma0912me	1206–1667		Подножие фронта, in situ. Первое кольцо, лиственница	
		ma1109_1	1616–1882	2264	Остатки лиственниц	50,107700 87,599833
		ma1110_1	1681–1779			
		ma1112_1	1601–1782			
		ma1113me	1146–1347	2223	Остатки кедра на морене, первое кольцо	50,109450 87,598300
		ma1114me	1059–1470		Кусок ствола кедра	
		ma1115_1	1281–1575		Фрагменты кедра на морене	
		ma1116me	1206–1406		Кедр	
		ma1117me	1138–1650		Остатки комля, кедр	

*а и б соответствуют диаграммам на рис. 5. Образцы отбирались или в непосредственной близости от морены (метры), или на глыбах морены. Если не указано специально, то образец не является in situ; если не указано наличие первого и подкорového кольца, то они отсутствуют. Расшифровка аббревиатуры аналогична табл. 2. Даты 2009–2011 гг. опубликованы ранее (Назаров и др., 2016).

бережной части, где он круто поднимается на подножие коренного борта в виде небольшой заросшей кустарником полосы глыб и щебня высотой от 2 до 0,5 м (см. рис. 5, Г, 3). Левобережная часть выражена в виде несколько распластанного невысокого вала. Непосредственно над ним возвышается частично задернованная и покрытая молодым лесом морена Исторической стадии (см. рис. 5). Некоторые находки имеют положение близкое к in situ и обнаружены в 3–5 м перед мореной (насколько её край можно определить в настоящее время (см. рис. 5, Д), некоторые, в виде уже фрагментов стволов, лежат непосредственно на глыбах в 1–3 м от края (рис. 5, Б, В). Большая их часть принадлежит кедр, ареал которого в настоящее время не включает в себя предполья и пространство ниже молодой морены (до 1,5 км) и находится на высоте не более 2120 м, исключая редкий подрост на скалах по правому борту долины.

Результаты анализа показывают, что большинство деревьев, как и на предпольях ледников Актру, погибли на рубеже XVII–XVIII вв.

(см. табл. 3). Часть деревьев, несомненно, была уничтожена наступающим ледником, некоторые погибли от его охлаждающего воздействия, а некоторые, как и по подножию правой части морены Малого Актру, пережили его близость (см. рис. 5, б; см. табл. 3, образцы ma1109_1, ma1110_1, ma1112_1) и погибли по причинам, не связанным с ледником, поскольку, как показывает пример Малого Актру (Ивановский, Панычев, 1978), в конце XIX в. ледники уже значительно отступили, освободив пространство, достаточное для заселения подростом.

Ледник № 27 в истоках р. Шавла. Исследования в бассейне р. Шавла проводили в истоках первого левого притока реки на морене небольшого ледника № 27 (Каталог ледников СССР..., 1977). Морена имеет свежий вид и была воспринята как молодая, но результаты лихенометрии показали, насколько может быть обманчиво первое впечатление (рис. 6; см. табл. 1). Возраст погибших деревьев, находящихся на морене и по её подножию, убедительно продемонстрировал, что они гибли в разное время и по разным причинам

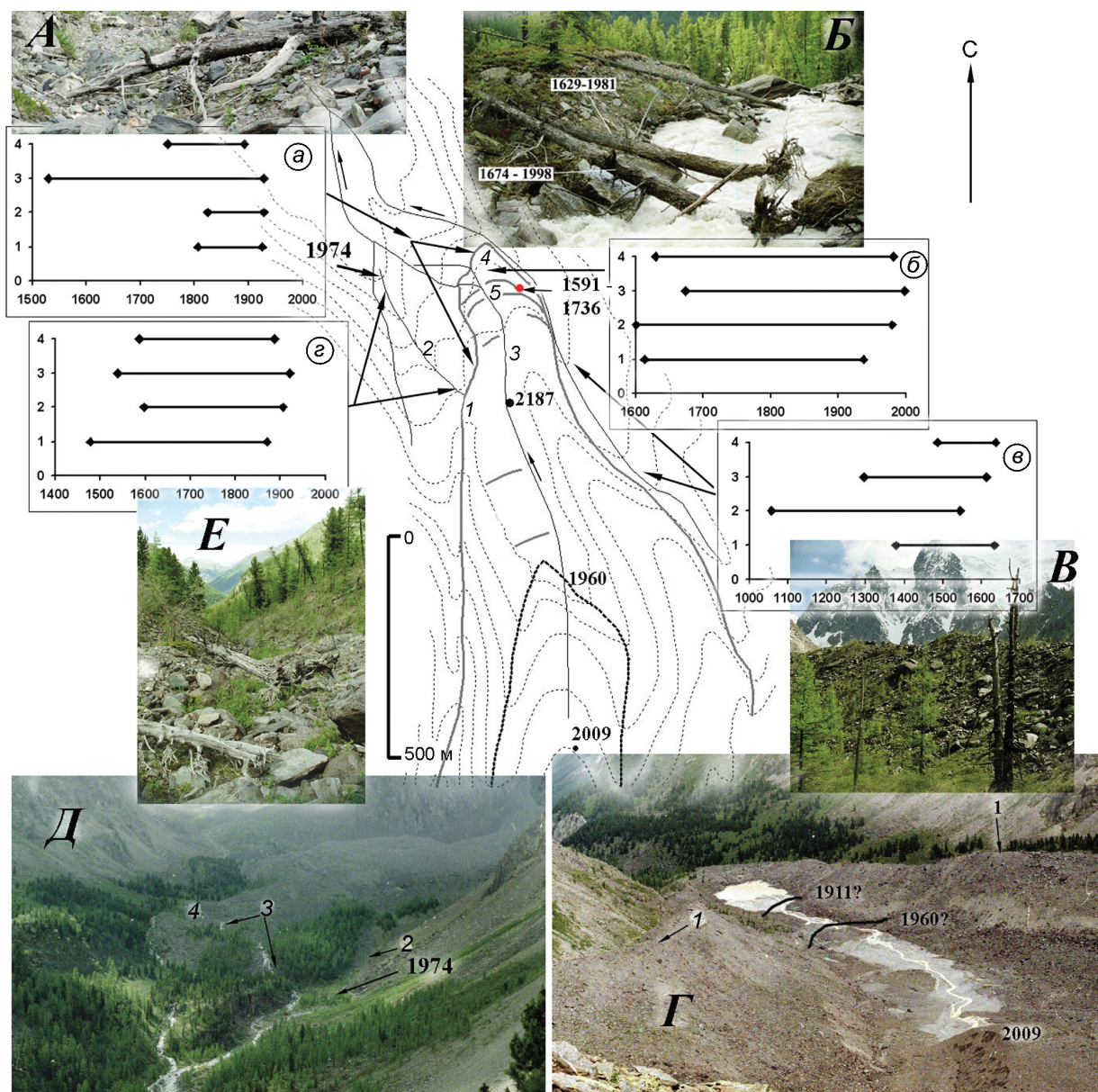


Рис. 6. Ледник и предполя левостороннего истока р. Шавла, местоположение и возраст образцов древесины:

A – погибшая лиственница у подножия фронта морены; *Б* – деревья и даты их гибели в новом русле реки; *В* – деревья, занесённые флювиогляциальными отложениями ледника – притока по подножию правой боковой морены; *Г* – вид сверху на язык ледника и внутреннюю часть морены; *Д* – вид на морену с левого борта долины; *Е* – бывшее русло реки и погибшие деревья. 1 – моренные валы различных генераций; 2 – бывшее русло реки (после 1920 г. – ранее 1974 г.); 3 – современное русло; 4 – внешняя морена (Историческая стадия); 5 – максимальное продвижение ледника в стадию Актру (образец 1591–1736 гг.). 1911, 1960, 2009 – положение фронта ледника в соответствующие годы. 1974 – время появления подроста лиственницы в старом русле реки. 2187 – абсолютная отметка высоты. Врезки: *a* – подножие морены Исторической стадии; *б* – деревья во внутренней части морены Исторической стадии; *в* – деревья по подножию правой боковой морены; *г* – старое неактивное русло реки

Fig. 6. Glacier and its forefields at the left source of the Shawla river, location and age of wood samples:

A – dead larch at the foot of the moraine front; *B* – trees and dates of their death in a new river bed; *B* – trees transported by fluvio-glacial deposits of the glacier – the tributary along the foot of the right lateral moraine; *Г* – top view of the tongue of the glacier and the inner part of the moraine; *Д* – view of the moraine from the left side of the valley; *E* – the former river bed and dead trees. 1 – moraine of various generations; 2 – the former river bed (after 1920 – before 1974); 3 – modern channel; 4 – outer moraine (Historical stage); 5 – the maximum advance of the glacier during the Aktru stage (sample 1591–1736 year). 1911, 1960, 2009 – position of the glacier front in the corresponding years. 1974 – the time of the appearance of larch undergrowth in the old riverbed. 2187 – absolute height mark. Insets: *a* – the foot of the moraine of the Historical stage; *б* – trees in the inner part of the moraine of the Historical stage; *в* – trees at the foot of the right lateral moraine; *г* – old, inactive river bed

Таблица 4. Дендрохронологические даты предпольев ледника № 27 по (Каталог ледников СССР..., 1977) в верховьях р. Шавла*

Местоположение	Номер образца	Возраст спила, гг. н.э.	Абсолютная высота, м	Примечания	Координаты, WGS 84, градусы
Фронт морены	а	sa0806	2155	Лиственницы, подножие морены, первое кольцо, подкорковое кольцо, in situ	50,092710 87,398860
		sa0807			
		sa0808	2160	Рядом, погребённая лиственница, первое кольцо, подкорковое кольцо, in situ	50,093347 87,398500
		sa0809	2138	Погребённая лиственница, первое кольцо, in situ	50,094520 87,399549
Внутренняя часть морены (Историческая стадия)	б	sh0703	2174	Лиственница, повалена в результате просадок, подкорковое кольцо, in situ	50,094260 87,399430
		sh0704	2160	Лиственница, подкорковое кольцо, in situ	50,094370 87,399550
		sh0705	2150	Лиственницы в русле реки, подкорковое кольцо, in situ	50,093950 87,397510
		sh0706			
		sh0902	2160	Вблизи молодой морены, кедр, внешняя часть ствола, in situ	50,093420 87,400270
Подножие правой боковой морены	в	Sh0701	2180	Кедр, занесён отложениями ручья, in situ	50,091950 87,402230
		Sh0702	2180	То же, в непосредственной близости, in situ	50,089060 87,405920
		sa0906me	2248	Сломанный ствол в русле ручья, кедр, первое кольцо, in situ	50,089060 87,405920
		6911	2157	Фрагмент ствола вблизи русла ручья, на 1,5 м выше уреза, кедр	50,093720 87,400880
Старое русло реки	г	sa5me	2165	Погибший кедр, верхняя часть русла, вершина, первое кольцо, подкорковое кольцо, in situ	50,09177 87,39775
		pr0901	2174	Верхняя часть русла, сломанный кедр, in situ	50,09169 87,39802
		sa0907me	2107	Нижняя часть русла, кедр в отложениях потока	50,09370 87,39604
		sa0908_1			

*а, б, в, г соответствуют врезкам на рис. 6. Если не указано специально, то образец не является in situ; если не указано наличие первого и подкоркового кольца, то они отсутствуют. Расшифровка аббревиатуры, исключая образцы 6911 и sa5me, аналогична табл. 2. Дата sh0902 опубликована ранее (Назаров и др., 2016).

(см. рис. 6; табл. 4). Положение фронта ледника № 27 в конце XVII – начале XVIII вв. однозначно маркируется двумя высохшими на корню кедром, внешний спил одного из которых показал возраст 1591–1736 гг. (см. рис. 6, цифра 5, образец sh0902; см. табл. 4). Деревья находятся на морене Исторической стадии, в 30–50 м от подножия высокого вала молодой морены – максимума наступания во время стадии Актру. При этом, как по периметру морены Исторической стадии, так и в её внутренней части продолжал расти лес (см. рис. 6, а–в, А–Б; см. табл. 4).

В это же время (до начала XVIII в.) происходит гибель кедров, росших вблизи русла ручья, стекающего с ледника-притока по подножию правой боковой морены (см. рис. 6, В, в;

табл. 4, в) в результате заноса флювиогляциальными отложениями. Фрагмент внешней части одного из них был найден среди глыб в нескольких метрах от русла, но на 1,5 м выше его современного уреза, что свидетельствует о расхождении реки, кратное превышавшему современный. Остаётся неясным вопрос, каким образом происходила разгрузка реки, стекающей с ледника. Вероятнее всего, русла, обозначенного на карте, ранее не существовало (см. рис. 6, цифра 2), деревья продолжали расти здесь до конца XIX – начала XX вв. (см. рис. 6, Е, г; см. табл. 4, е). С начала XX в. происходит коренная трансформация фронта морены, в частности её части, принадлежащей Исторической стадии: проседание и, как следствие, гибель множества деревьев

вплоть до погребения под оседающими глыбами (см. рис. 6, *а, А*; см. табл. 4, *а*). В левой части морены в это же время образуется (или расширяется) промоина, которая становится руслом реки, возможно не единственным (см. рис. 6, *г, Д, Е*, цифра 2). В середине XX в. процессы эрозии и деградации погребённого льда приводят к размыву центральной части вала молодой морены стадии Актру, которая подпруживала озеро (см. рис. 6, *Г*). Это способствует формированию нового русла, осушению старого и гибели деревьев уже во внутренней части морены, не только оказавшихся в потоке, но и по его периферии (см. рис. 6, *б, Б*; см. табл. 4, *б*). Этот процесс продолжается и до настоящего времени, хотя и в меньшем масштабе.

Размеры лишайников внешней морены (см. рис. 6, цифра 4; см. табл. 1) соответствуют Исторической стадии. Их несколько меньший размер по сравнению с долинами Актру и Маашей объясним небольшим размером глыб на морене, которые гораздо более подвижны. После смены рекой направления подрост лиственницы заселил освободившееся пространство старого русла около 1974 г. (керна с трёх наиболее крупных деревьев в старом русле реки; см. рис. 6). Принимая время заселения минимальным (не более десяти лет), получаем, что русло изменилось не позднее 1964 г. Аналогично, принимая время заселения лишайниками в старом русле реки (см. рис. 6, *Д, Е*; см. табл. 1) также около десяти лет, получаем, что на момент проведения лихенометрии (2009 г.) возраст достигал 35 лет. Скорость прироста составляет около 0,9 мм/год, что маловероятно. Скорее всего, часть лишайников — унаследованная, но объективное выделение их из выборки невозможно. Описанные здесь события логично вписываются в общий контекст состояния ледников и их ближайшего окружения в долинах Актру и Маашей.

Обсуждение результатов

Наиболее достоверные и точные данные о наступаниях ледников в прошлом основаны на датах гибели погребённых ими деревьев. К сожалению, такие хронологии в мире немногочисленны (Holzhauser et al., 2005; Назаров, Мыглан, 2012; Menounos et al., 2019; Hall et al., 2019 и др.),

а интерпретация результатов датирования и условий залегания образцов древесины сложна и часто неоднозначна. Даты жизни дерева, растущего или росшего на предпольях ледника, указывают на интервал времени, когда ледник здесь отсутствовал, и отражают минимальный возраст стабилизации поверхности, хотя окончательная интерпретация, несомненно, зависит от причин гибели. Так, в случае ледников Большой и Малый Актру (см. рис. 4, *б, в, д*) и отчасти ледника Маашей (см. рис. 5) имеем дело с остатками деревьев, на которые ледники не оказывали механического воздействия, и их гибель была определена исключительно ухудшением климатических условий. На предпольях ледника № 27 по этой причине погибло дерево, датированное 1591–1736 гг. (см. рис. 6 и табл. 4, образец sh0902). Важна и информация о скорости освоения приледниковья. Для морен 1911 и 1936 гг. ледника Малый Актру она составляет 45–50 лет (данные А.Н. Назарова). Пионером в освоении освободившихся ото льда территорий на Алтае всегда выступает лиственница.

При наличии единого лимитирующего фактора выявленные даты гибели деревьев должны группироваться вокруг определённых периодов. По этой причине наиболее поздняя дата при наличии достаточной выборки и согласованности результатов укажет на время наступания ледников и вызвавшего его похолодания. К сожалению, точное время гибели деревьев часто определить не удаётся из-за отсутствия подкорковых колец, которые нередко разрушаются со временем. Вопрос о том, сколько внешних колец потеряно у каждого образца, почти всегда остаётся открытым. Величина потерь в каждом случае строго индивидуальна и зависит от множества факторов: характера местообитания; наличия и изменчивости асимметрии прироста; характера возрастной кривой; собственного возраста дерева; наличия травы и кустарников, способствующих развитию гнили и т.п. Единственная возможность уточнить итоговую дату — увеличить выборку. В нашем случае состояние, по меньшей мере, половины образцов оценивается как хорошее и очень хорошее, что позволяет предполагать потерю минимального количества колец.

Лихенометрические исследования дают представление об относительном возрасте и степени стабильности незадернованных участков гор-

ных долин, (морены, осыпи, лавинные конуса, каменные глетчеры, участки камнепадов и т.п.). Сопоставление полученных результатов с построенными ранее кривыми скорости роста (см. рис. 2) показывает, что поверхности с максимальным размером лишайников около 30–35 мм принадлежат стадии Актру и имеют возраст около двух столетий. Это соответствует более ранним оценкам скорости роста (Соломина, 1999). Размер лишайников на моренах исторической стадии имеет очень большой разброс — от 101 до 154 мм — и не считается информативным для определения абсолютного возраста поверхностей. Теоретические значения максимальных лишайников на этой морене составили от 120 до 160 мм, что тоже слишком много для реалистических оценок времени стабилизации морен. Как отмечалось ранее, возраст морен исторической стадии до сих пор достоверно не известен. Он оценивается интервалом ранее 2,3–1,7 тыс. л.н. (Agatova et al., 2021). Теоретически в будущем есть шанс уточнить кривую роста и применить её в диапазоне до 2–2,5 тыс. л.н. Возраст Аккемской морены, согласно последним данным, относится к позднеледниковью. Очевидно, что возможность применения лихенометрии для датирования столь древних объектов невозможна. При наличии древесных пород недостатки лихенометрии компенсируются наличием дендрохронологических дат, что позволяет восстанавливать картину событий иногда даже в деталях до нескольких десятков (ледник № 27) или сотен лет (ледники Актру).

Наступание ледников XVII — начала XIX вв.

Дендрохронологический анализ показывает, что на предпольях изученных ледников на разной высоте подавляющее большинство деревьев погибло ранее начала XVIII в. (исключая крайнюю правую часть морены Малого Актру (см. рис. 4, д), три лиственницы на морене ледника Маашей (см. рис. 5, б) и кедр на морене ледника № 27. Рубеж XVII–XVIII вв. характеризует максимальный возраст исследуемых морен стадии Актру. Этот период наибольшей активности ледников Алтая в стадию Актру продолжался около столетия. Несмотря на то, что на предпольях всех осмотренных ледников (исключая низко-расположенный ледник № 27) деревья массово погибли в конце XVII — начале XVIII вв., справа от ледника Малый Актру продолжал расти лес

(см. рис. 4, д и лиственницы по правому фронту морены, см. табл. 2). Очевидно, ледник находился на таком расстоянии от деревьев, что его охлаждающее влияние не было для них губительным. Такая ситуация возможна только при условии прямолинейного распространения ледника до момента упора в левый борт долины, без слияния с Большим Актру. Именно так и происходило в стадию Актру. Тем не менее, мы наблюдаем наличие правой части моренного комплекса, отходящей под углом около 40° от основной оси ледника и осложнённой дополнительными валами, образование которой датируется концом XVIII — началом XIX вв. и объясняется нами пульсацией правого притока ледника. К благоприятным условиям её возникновения относятся: большая площадь области питания притока и независимость её от основного ледника; крутой уклон ложа (как Малого Актру, так и его притока); незначительное расстояние от слияния до выхода в основную долину (около 500 м). К необходимым условиям относится наличие подпруды в виде развитого языка Малого Актру и положительный баланс ледников.

Расчёт лихенометрического возраста для молодых морен Большого Актру и Маашей по уравнению $y = 5,781x + 22,157$ показывает их существенную разницу (см. рис. 2), обусловленную различием в расчётном максимуме диаметра лишайников (см. табл. 1): 182 года для Большого Актру и 263 года для Маашей. Из-за недостаточности выборки, полученной для Маашейской морены, результат может применяться только как оценка возраста в самом первом приближении. Существует вероятность, что эти морены действительно имеют разный возраст и маркируют две одновременные осцилляции наступания ледников в пределах одной стадии. Для ледника Большой Актру, напротив, лихенометрическая дата стабилизации поверхности морены около 1830 г. хорошо согласуется с минимальным возрастом, установленным по дендрохронологии (первая половина XIX в.).

Распределение периодов появления и гибели деревьев во времени (рис. 7, усл. обозн. 3 и 4) свидетельствует, что на протяжении обозримого периода времени лес постепенно утрачивал свои позиции в приледниковье, вплоть до полного исчезновения на высоких уровнях (2350–2300 м) и массовой гибели на более низких высотах

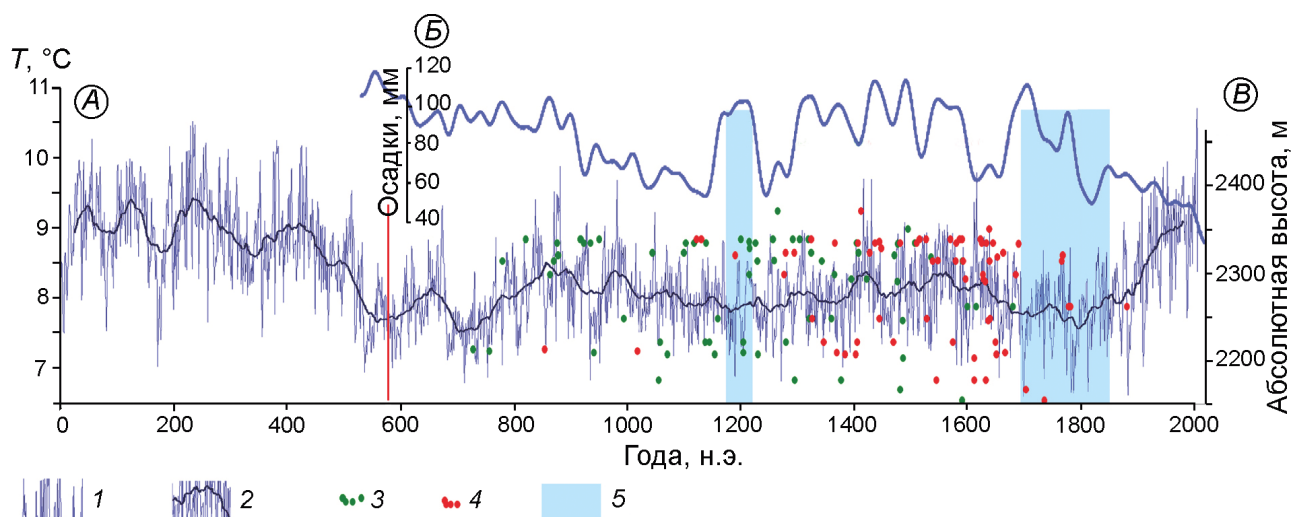


Рис. 7. Наступание ледников Центрального Алтая в контексте изменчивости июнь-июльской температуры на метеостанции Актру, количества осадков в Восточном Алтае и гибели леса на их предполях:

A – реконструкция июнь-июльской температуры на метеостанции Актру (Назаров и др., 2016): 1 – ежегодные значения; 2 – сглаженные по 50-летиям; *B* – колебания среднеиюльского количества осадков (сорокалетнее скользящее среднее) (Чуракова, 2019); *B* – абсолютная высота; 3 – первые и 4 – последние даты на спилах, использованные в данной работе (см. табл. 2); 5 – периоды наступаний ледников

Fig. 7. The advance of glaciers in Central Altai in the context of the June-July temperature variations at the Aktru meteorological station, precipitation in Eastern Altai and the death of the forest on her forefields:

A – reconstruction of the June-July temperature at the Aktru meteorological station (Назаров и др., 2016): 1 – annual values; 2 – smoothed over 50 years; *B* – fluctuations in the average July rainfall (40-year moving average) (Чуракова, 2019); *B* – absolute elevation, and also: 3 – the first and; 4 – last dates on the cuts, used on this work (see Table 2); 5 – periods of glacier advances

(2300 м и ниже) в XVII–XVIII вв. Судя по реконструкциям летних температур и осадков июля (см. рис. 7), XVIII век был холодным и влажным в летний период. Примечательно, что максимум наступания ледников на Алтае завершился во время самого холодного за всё тысячелетие периода, отмечаемого по дендрохронологическим данным в середине XIX в. (Büntgen et al., 2016) (см. рис. 7). Как показал Ю.К. Нарожный (1986), баланс Малого Актру в это время имел отрицательные значения, что связано с уменьшением количества зимних осадков.

Наступания ледников XVII – начала XIX вв. известны в большинстве горных стран мира и представляют собой классическое проявление активизации оледенения в так называемый малый ледниковый период, моренные комплексы которого в большинстве районов состоят из нескольких разновозрастных валов, маркирующих последовательно уменьшающиеся по размаху колебания серии наступаний (Solomina et al., 2016). Судя по лихенометрическим данным, на Алтае отложения второй фазы этого времени обычно состоят из одной морены, что свиде-

тельствует о меньших масштабах оледенения до XVII – начала XIX вв. Отсутствие морен, образовавшихся между XVII – началом XIX вв. и наступанием предыдущей стадии в XII в., возможно, связано со всё ещё недостаточной детальностью доступного нам материала для датирования морен. Не исключено, что следы более ранних наступаний будут обнаружены, например, по космогенным изотопам, поскольку косвенные палеоклиматические данные (ледниковые керны, биостратиграфия, дендрохронология) свидетельствуют о похолоданиях, которые отмечались на Алтае и в интервале XII–XVII вв. Так, данные анализа ледникового керна Белухи (Aizen et al., 2016) показывают, что наиболее холодными были периоды около 1300, 1450–1550, 1700, 1840 и 1930 гг., примерно совпадающие (запаздывающие на 10–30 лет) с солнечными минимумами (Wolf, Sporer, Maunder, Dalton, Gleissberg) (Eichler et al., 2009). В период похолодания, начиная примерно с XV в., среднегодовая температура воздуха на Алтае была на $3,2 \pm 1,7$ °C ниже, чем в конце XX в. Согласно спорово-пыльцевым данным, максимальное похолода-

ние на Алтае было между 1450 и 1800 гг. (Rudaya et al., 2016).

Термическая граница леса в XVII в. опустилась более чем на 100 м (Назаров и др., 2016), поэтому деревья в приледниковье оказались близко к границе возможностей существования, и вероятность их гибели в это время в значительной степени определялась расстоянием до края наступающего ледника (см. рис. 7). На низкорасположенных моренах (2200 м и ниже) безопасное расстояние, за пределами которого деревья сохранились полностью, составляло первые десятки метров. Выше 2300 м лес практически повсеместно утратил ареал своего распространения и лишь в виде подроста возобновляет его в настоящее время.

Средневековый оптимум и наступание ледников в XII в. Несколько датировок субфоссиальной древесины на моренах ледника Актру дают основание предположить, что в XII в. на Алтае происходило наступание ледников ощутимого масштаба. По данным О.В. Чураковой (2019) в XII в. был зафиксирован резкий рост осадков. Эта реконструкция относится к июлю и для ледников без одновременного похолодания вряд ли могла быть благоприятной. Дендрохронологические данные фиксируют лишь небольшое понижение летних температур в это время. Таким образом, ухудшение климатических условий и активизация оледенения на Алтае в XII в. всё ещё остаётся скорее гипотезой. Вместе с тем по данным анализа ледникового керна с западного плато Белухи (4115 м) примерно на 1100-е годы н.э. приходится окончание средневекового оптимума на Алтае, который наблюдался здесь приблизительно с 640 г. н.э. (Aizen et al., 2016). Это согласуется со спорово-пыльцевыми данными, которые относят начало похолодания после оптимума к 1100–1150 гг. н.э. (Rudaya et al., 2016).

Наступание ледников в XII в., между 1120–1180 гг. н.э., известно во многих районах: в Альпах, Скалистых горах, Гренландии, Новой Зеландии, и, имея в виду неточности датирования, вероятно, связано с вулканическими извержениями в 1108 и 1170 гг. (Solomina et al., 2016).

Состояние оледенения в VIII в. Находки субфоссиальной древесины в центральной части морены Малого Актру (Назаров, Мыглан, 2012; Назаров и др., 2016) указывают на то, что уже с VIII в. предполья ледника были заселены дере-

вьями, которые имели собственный возраст и размеры, превышающие те, которые имеет подрост лиственницы, растущей здесь в настоящее время (см. рис. 4, а; см. табл. 2). Следовательно, размеры ледника в VIII в. соответствовали современным; не исключено, что он был меньше, чем сегодня. Период первой половины VIII в. характеризуется как влажный и один из самых холодных в первом тысячелетии новой эры (см. рис. 7). В то же время мы наблюдаем присутствие живых деревьев на его предпольях. Очевидно, что, несмотря на сочетание столь благоприятных условий, ледник в это время не достиг размеров, достаточных для погребения обнаруженных остатков. С VIII по XII в. лес произрастал во внутренней части современной морены Малого Актру.

Историческая стадия. Возраст морен Исторической стадии на Алтае до сих пор достоверно не известен. На основе комплекса данных А.Р. Агатова с соавторами (Agatova et al., 2021) относит его к периоду ранее 2,3–1,7 тыс. л.н. (калиброванный радиоуглеродный возраст). Однако это частично противоречит спорово-пыльцевым данным, полученным по осадкам Телецкого озера, которые свидетельствуют о тёплом (на 1 °C выше современной июльской температуры) периоде между 2,7 и 1,6 тыс. л.н. (Rudaya et al., 2016). Основываясь на реконструкции летних температур (см. рис. 7), выполненной по дендрохронологическим данным, которые указывают на термический максимум с начала новой эры примерно до VI в. и потепление VII–XI вв. (см. ранее), мы полагаем, что время образования морен этой стадии – более 2 тыс. л.н.

В долине ледника № 27 бассейна Шавлы мы получили довольно редкую возможность выявить максимальный и минимальный возраст времени существования старого русла реки (см. рис. 6) и сравнить возможности лихенометрии и дендрохронологии применительно к одному объекту. Полагаем, что погибшие и полужасыпанные деревья по фронту морены маркируют в данном случае не наступание ледника, а оседание морены в результате таяния линз льда в её толще. Этот процесс деформации и связанная с ним гибель деревьев продолжается и в настоящее время. Решить вопрос о возрасте этих отложений оказалось возможно только с помощью лихенометрии, которая подтвердила принадлежность морены

к исторической стадии. Результаты лихенометрии исторической морены ледника Маашей (см. рис. 5; см. табл. 1) также помогли установить сходство во времени её стабилизации с отложениями долины Актру (см. рис. 3, изолиния 160) у подножья левого и правого бортов, что определённо указывает на максимальную амплитуду продвижения ледника Актру в это время.

Выводы

1. Ледники Северо-Чуйского хребта в последнем тысячелетии максимально продвигались вперёд в XVII – начале XIX вв. (наибольший по масштабу) и в XII вв. В VIII в. их размеры были меньше, чем в стадию Актру, и, возможно, приближались к современным.

2. После XVII в. кедр существенно сократил свой ареал как по абсолютной высоте, так и по оси большинства долин, отступив из приледниковья, где он был распространён ранее. Деревья, росшие вблизи ледников, выше отметок 2300 м погибли полностью.

3. Почти все даты, указывающие на наступления ледников, исключая морену Малого Актру, не относятся к прямым доказательствам наступаний, но совокупность косвенных признаков, большая репрезентативность выборки, а также согласованность данных дают основание надеяться на достоверность изложенных здесь выводов.

4. Лихенометрия – важный инструмент для относительного датирования морен. Её использование в комплексе с дендрохронологией показало свою эффективность. Скорости роста лишайников-индикаторов на моренах стадии Актру в целом согласуются с опубликованными ранее

оценками. Перспективным может быть использование этого метода для изучения поверхностей в диапазоне от XX в. до двух – двух с половиной тысячелетий, хотя эти оценки возраста могут быть только очень приблизительными.

Благодарности. Анализ материалов и написание работы проводили в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (код научной темы FSRZ–2020–0010) и работ РНФ (код научной темы 19–17–00179) «Ледниковая история и катастрофические процессы на Русском Алтае в позднем плейстоцене–голоцене». Авторы выражают благодарность В.П. Галахову, по инициативе которого возобновлены лихенометрические исследования на моренах Алтая, а также составлен ряд длительных хронологий по кедру (*Pinis Sibirica*), Д.В. Овчинникову и Н.А. Володичевой за подробный разбор рукописи, О.К. Авдеевой – за помощь в техническом оформлении.

Acknowledgements. The analysis of materials and writing of the work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (scientific topic code FSRZ–2020–0010), as well as within the framework of the Russian Science Foundation (scientific topic code 19–17–00179) «Glacial history and catastrophic processes in the Russian Altai in the late Pleistocene-Holocene». The authors express their gratitude to V.P. Galakhov, on whose initiative, lichenometric studies on the Altai moraines were resumed, and a number of long chronologies on cedar (*Pinis Sibirica*) were compiled; D.V. Ovchinnikov and N.A. Volodicheva, for a very detailed analysis of the manuscript; O.K. Avdeeva for assistance in technical design.

Литература

- Адаменко М.Ф., Сябаев А.А. Динамика климата на территории Горного Алтая в XV–XX веках по данным дендрохронологии // Вопросы горной гляциологии. Томск: Томский гос. ун-т. 1977. С. 196–202.
- Быков Н.И. Дендрогейоморфология Алтая. Геоморфология гор и предгорий. Барнаул: Алтайский гос. ун-т, 2002. С. 41–48.
- Галанин А.А. Лихенометрия: современное состояние и направление развития метода (аналитический обзор). Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2002. 72 с.

References

- Adamenko M.F., Syubaev A.A. Climate dynamics on the territory of the Altai Mountains in the XV–XX centuries according to dendrochronology. *Voprosy gornoj glyciologii*. Questions of mountain glaciology. Tomsk: Tomsk State University, 1977: 196–202. [In Russian].
- Bykov N.I. *Dendrogeomorfologiya Altaya. Geomorfologiya gor i predgorij*. Dendrogeomorphology of Altai. Geomorphology of mountains and foothills. Barnaul: Altai State University, 2002: 41–48. [In Russian].
- Galanin A.A. *Likhenometriya: sovremennoye sostoyaniye i napravleniye razvitiya metoda (analiticheskii obzor)*. Lichenometry: the current state and development of

- Галахов В.П., Мухаметов Р.М. Ледники Алтая. Новосибирск: Наука, 1999. 136 с.
- Галахов В.П., Назаров А.Н., Харламова Н.Ф. Коледания ледников и изменения климата в позднем голоцене по материалам исследований ледников и ледниковых отложений бассейна Актру (Центральный Алтай, Северо-Чуйский хребет). Барнаул: Алтайский гос. ун-т, 2005. 132 с.
- Галахов В.П., Назаров А.Н., Самойлова С.Ю., Мардасова Е.В. Горный узел Белухи. Барнаул: Алтайский гос. ун-т, 2018. 124 с.
- Давыдов Е.А., Быков Н.И. Исследования археологических памятников Укока (Алтай) в целях региональной адаптации лихенометрического метода их датирования // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии: Сб. науч. статей по материалам XII Междун. науч.-практ. конф. Барнаул: Алтайский гос. ун-т, 2013. С. 228–231.
- Ивановский Л.Н., Панычев В.А. Развитие и возраст конечных морен XVII–XIX вв. ледников Ак-Туру на Алтае // Процессы современного рельефообразования в Сибири. Иркутск: Наука, 1978. С. 127–138.
- Каталог ледников СССР. Бассейн р. Аргута. Т. 15. Вып. 1. Ч. 5. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 47 с.
- Мыглан В.С., Ойдунаа О.Ч., Кирдянов А.В., Ваганов Е.А. 1929-летняя древесно-кольцевая хронология для Алтае-Саянского региона (Западная Тува) // Археология, этнография и антропология Евразии. 2008. № 4 (36). С. 25–31.
- Назаров А.Н., Мыглан В.С. Перспективы построения 6000-летней хронологии по сосне сибирской для территории Центрального Алтая // Сб. СФУ. Сер. биологическая. 2012. № 5. С. 70–88. doi.org/10.17516/1997-1389-0153.
- Назаров А.Н., Мыглан В.С. Применение кедра сибирского с целью реконструкции климата и геоморфологических событий на Алтае // Изв. РАН. Сер. геогр. 2013. № 2. С. 43–51. doi.org/10.15356/0373-2444-2013-2-43-51.
- Назаров А.Н., Мыглан В.С., Орлова В.А., Овчинников И.Ю. Активность ледника Малый Актру (Центральный Алтай) и изменения границы леса в бассейне Актру за исторический период // Лёд и Снег. 2016. № 1 (56). С. 103–118. doi.org/10.15356/2076-6734-2016-1-103-118.
- Наро́жный Ю.К. Реконструкция баланса массы и условий льдообразования ледника Малый Актру за 150 лет // Гляциология Сибири. Томск: Тюменский гос. ун-т, 1986. С. 85–104.
- Окишев П.А. Динамика оледенения Алтая в позднем плейстоцене и голоцене. Томск: Тюменский гос. ун-т, 1982. 210 с.
- Соломина О.Н. Горное оледенение Северной Евразии в голоцене. М.: Научный мир, 1999. 272 с.
- Чуракова О.В. Изменение климата в высокоширотных и высокогорных районах Евразии на основе анализа the method (analytic review). Magadan: NEISRI FEB RAS, 2002: 72 p. [In Russian].
- Galakhov V.P., Mukhametov R.M. *Ledniki Altaya*. Glaciers of Altai. Novosibirsk: Nauka, 1999: 136 p. [In Russian].
- Galakhov V.P., Nazarov A.N., Kharlamova N.F. *Kolebaniya lednikov i izmeneniya klimata v pozdnem golotsene po materialam issledovaniy lednikov i lednikovyykh otlozheniy basseyna Aktru (Tsentral'nyi Altay, Severo-Chuyskii khrebet)*. Fluctuations of glaciers and climate changes in the Late Holocene based on the materials of studies of glaciers and glacial deposits of the Aktru basin (Central Altai, Severo-Chuisky ridge). Barnaul: Altay State University, 2005: 132 p. [In Russian].
- Galakhov V.P., Nazarov A.N., Samoilova S.Y., Mardasova E.V. *Gorniy uzel Belukhi*. Mountain node of the Belukha. Barnaul: Altay State University, 2018: 124 p. [In Russian].
- Davydov E.A., Bykov N.I. Research of archaeological monuments of Ukok (Altai) for the purpose of regional adaptation of the lichenometric method of their dating. *Problemy botaniki Yzhnoy Sibiri i Mongolii: Sbornik nauchnykh statey po materialam XII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Problems of botany in Southern Siberia and Mongolia: The materials of the XII International Scientific and Practical Conference. Barnaul: Altay State University, 2013: 228–231. [In Russian].
- Ivanovskiy L.N., Panychev V.A. Development and age of the terminal moraines of the XVII–XIX centuries. Ak-Turu glaciers in Altai. *Processy sovremennogo rel'efoobrazovaniya v Sibiri*. Processes of modern relief formation in Siberia. Irkutsk: Science, 1978: 127–138. [In Russian].
- Katalog lednikov SSSR. Basseyn r. Arguta. USSR Glacier Inventory. Argut river basin. V. 15. Is. 1. Pt. 5. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977: 47 p. [In Russian].
- Myglan V.S., Oidupaa O.Ch., Kirdianov O.V., Vaganov E.A. 1929-year tree-ring chronology for the Altai-Sayan region (western Tuva). *Arkheologiya, etnographiya i antropologiya Ewrazii*. Archaeology, ethnology and anthropology of Eurasia. 2008, 4 (36): 25–31. [In Russian]. doi: 10.1016/j.aeae.2009.03.003.
- Nazarov A.N., Myglan V.S. The Possibility of Construction of the 6000-year Chronology for Siberian Pine in the Central Altai. *Sb. SFU. Seriya biologicheskaya*. Journ. of Siberian Fed. University. Ser. Bio. 2012, 5 (1): 70–88. [In Russian]. doi.org/10.17516/1997-1389-0153.
- Nazarov A.N., Myglan V.S. Application of Siberian Cedar for Reconstruction of Climate and Geomorphological events in Altai. *Izvestiya Ros. Akad. Nauk. Seriya geograficheskaya*. Proc. of RAS. Geogr. Series. 2013, 2: 43–51. [In Russian]. doi.org/10.15356/0373-2444-2013-2-43-51.
- Nazarov A.N., Myglan V.S., Orlova V.A., Ovchinnikov I.Yu. Activity of the Malyi Aktru Glacier (Central Altai) and changes in the forest boundary in the Aktru basin for the historical period. *Led i Sneg*. Ice and snow. 2016, 1 (56): 103–118. [In Russian]. doi.org/10.15356/2076-6734-2016-1-103-118.
- Narozhny Y.K. Reconstruction of the mass balance and ice formation conditions of the Maly Aktru Glacier for 150 years. *Glaciologiya Sibiri*. Glaciology of Siberia. Tomsk: Tomsk State University, 1986: 85–104. [In Russian].

- стабильных изотопов углерода и кислорода в годичных кольцах хвойных: Автореф. дис. на соиск. учёного степ. д-ра биол. наук. Красноярск: СФУ, 2019. 39 с.
- Agatova A.R., Nazarov A.N., Nepop R.K., Rodnait H. Holocene glacier fluctuations and climate changes in the southeastern part of the Russian Altai (South Siberia) based on a radiocarbon chronology // *Quatern. Science Rev.* 2012. V. 43. P. 74–93. doi: 10.1016/j.quascirev.2012.04.012.
- Agatova A., Nepop R., Nazarov A., Ovchinnikov I., Moska P. Climatically Driven Holocene Glacier Advances in the Russian Altai Based on Radiocarbon and OSL Dating and Tree Ring Analysis // *Journ. of Climate.* 2021. V 9 (11). P. 1–31. doi: 10.3390/cli9110162.
- Aizen E.M., Aizen V.B., Takeuchi N., Mayewski P.A., Grigholm B., Joswiak D.R., Schwikowski M. Abrupt and moderate climate changes in the mid-latitudes of Asia during the Holocene // *Journ. of Glaciology.* 2016. V. 62 (233). P. 411–439. doi.org/10.1017/jog.2016.34.
- Barclay D. J., Wiles G.C., Calki P.E. Holocene glacier fluctuations in Alaska // *Quatern. Science Rev.* 2009. V. 28 (21–22). P. 2034–2048. doi: 10.1016/j.quascirev.2009.01.016.
- Bradwell T. Lichenometric dating: a commentary, in the light of some recent statistical studies // *Geografiska Annaler.* 2009. V. 91 (2). P. 61–69. doi.org/10.1111/j.1468-0459.2009.00354.x.
- Bull W.B., Brandon M.T. Lichen dating of earthquake-generated regional rockfall events, Southern Alps, New Zealand // *Bulletin of the Geolog. Society of America.* 1998. V. 110. P. 60–84. doi.org/10.1130/0016-7606(1998)110%3C0060:LDOEGR%3E2.3.CO;2.
- Büntgen U., Myglan V.S., Charpentier Ljungqvist F., Michael McCormick M., Di Cosmo N., Sigl M., Jungclauss J., Wagner S., Krusic P.J., Esper J., Kaplan J.O., de Vaan Michiel 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. V. 9 (3). P. 231–236. doi.org/10.1038/ngeo2652.
- Cook E.R., Kairiukstis L. *Methods of Dendrochronology: applications in environmental sciences.* Dordrecht. Boston. L.: Kluwer Acad. Publ., 1990. 394 p. doi: 10.1007/978-94-015-7879-0.
- Eichler A., Olivier S., Henderson K., Laube A., Beer J., Papina T., Schwikowski M. Temperature response in the Altai region lags solar forcing // *Geophys. Research Letters.* 2009. V. 36 (1). P. 12–17. doi: 10.1029/2008GL035930.
- Hall B.L., Lowell T.V., Bromley G.R.M., Denton G.H., Putnam A.E. Holocene glacier fluctuations on the northern flank of Cordillera Darwin, southernmost South America // *Quaternary Science Reviews.* 2019. V. 222. P. 21–42. doi: 10.1016/j.quascirev.2019.105904.
- Holmes R.L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement // *Tree-ring bulletin.* 1983. V. 44. P. 69–75.
- Holzhauser H., Magny M., Zumbühl H.J. Glacier and lake-level variations in west-central Europe over the Okishev P.A. *Dinamika oledeneniya Altaya v pozdnem pleystotsene i golotcene.* Dynamics of Altai glaciation in the Late Pleistocene and Holocene. Tomsk: Tomsk State University, 1982: 210 p. [In Russian].
- Solomina O.N. *Gornoe oledenenie Severnoi Evrazii v golotcene.* Mountain glaciation of Northern Eurasia in the Holocene. Moscow: Scientific World, 1999: 272 p. [In Russian].
- Churakova O.V. Climate change in high-latitude and high-mountainous regions of Eurasia based on the analysis of stable isotopes of carbon and oxygen in the annual rings of conifers. *Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni doktora biologicheskikh nauk.* Review of the dissertation, biological sciences. Krasnoyarsk: SSU, 2019: 39 p. [In Russian].
- Agatova A.R., Nazarov A.N., Nepop R.K., Rodnait H. Holocene glacial fluctuations and climate changes in the Southeastern part of the Russian Altai (Southern Siberia) based on radiocarbon chronology. *Quatern. Science Rev.* 2012, 43: 74–93. doi: 10.1016/j.quascirev.2012.04.012.
- Agatova A., Nepop R., Nazarov A., Ovchinnikov I., Moska P. Climatically Driven Holocene Glacier Advances in the Russian Altai Based on Radiocarbon and OSL Dating and Tree Ring Analysis. *Journ. of Climate.* 2021, 9 (11): 1–31. doi:10.3390/cli9110162.
- Aizen E.M., Aizen V.B., Takeuchi N., Mayewski P.A., Grigholm B., Joswiak D.R., Schwikowski M. Abrupt and moderate climate changes in the mid-latitudes of Asia during the Holocene. *Journ. of Glaciology.* 2016, 62 (233): 411–439. doi.org/10.1017/jog.2016.34.
- Barclay D.J., Wiles G.C., Calki P.E. Holocene glacier fluctuations in Alaska. *Quatern. Science Rev.* 2009, 28 (21–22): 2034–2048. doi: 10.1016/j.quascirev.2009.01.016.
- Bradwell T. Lichenometric dating: a commentary in the light of some recent statistical studies. *Geografis. Annaler.* 2009, 91 (2): 61–69. doi.org/10.1111/j.1468-0459.2009.00354.x.
- Bull W.B., Brandon M.T. Lichen dating of regional rockfalls caused by earthquakes, Southern Alps, New Zealand. *GSA Bulletin.* 1998, 110: 60–84. doi.org/10.1130/0016-7606(1998)110%3C0060:LDOEGR%3E2.3.CO;2.
- Büntgen U., Myglan V.S., Charpentier Ljungqvist F., Michael McCormick M., Di Cosmo N., Sigl M., Jungclauss J., Wagner S., Krusic P.J., Esper J., Kaplan J.O., de Vaan Michiel A., 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. doi.org/10.1038/ngeo2652.
- Cook E.R., Kayriukstis L. *Methods of dendrochronology: applications in environmental sciences.* Dordrecht. Boston. L.: Kluwer Academy. Publ., 1990: 394 p. doi: 10.1007/978-94-015-7879-0.
- Eichler A., Olivier S., Henderson K., Laube A., Beer J., Papina T., Schwikowski M. Temperature response in the Altai region lags solar forcing. *Geophys. Research Letters.* 2009, 36 (1): 12–17. doi:10.1029/2008GL035930.
- Hall B.L., Lowell T.V., Bromley G.R.M., Denton G.H., Putnam A.E. Holocene glacier fluctuations on the northern flank of Cordillera Darwin, southernmost South America. *Quatern. Science Rev.* 2019, 222: 21–42. doi:10.1016/j.quascirev.2019.105904.

- last 3500 years // *Journ. of Holocene*. 2005. V. 15 (6). P. 789–801. doi.org/10.1191/0959683605hl853ra.
- Innes J.L. Lichenometry // *Successes of Physical Geography*. 1985. V. 9. P. 187–254.
- Jomelli V., Grancher D., Naveau P., Cooley D., Brunstein D. Assessment study of lichenometric methods for dating surfaces // *Journ. of Geomorphology*. 2007. V. 86 (1–2). P. 131–143. doi: 10.1016/J.geomorph.2006.08.010.
- Locke W.W., Andrews J.T., Webber P.J. Guide to lichenometry. Technical Bulletin of the British Geomorphology Research Group. 1979. V. 26. 47 p.
- Luckman B.H. The little ice age in the Canadian Rockies // *Journ. of Geomorphology*. 2000. V. 32 (3–4). P. 357–384. doi: 10.1016/S0169-555X(99)00104-X.
- Menounos B., Maurer L., Clague J.J., Osborn G. Late Holocene fluctuations of Stoppani glacier, southernmost Patagonia // *Journ. of Quaternary Research*. 2019. V. 95. P. 56–64. doi.org/10.1017/qua.2019.87.
- Osborn G., McCarthy D., La Brie A., Burke R. Lichenometric dating: Science or pseudo-science? // *Quaternary Science Review*. 2015. V. 83 (1). P. 1–12. doi: 10.1016/j.yqres.2014.09.006.
- Rinn F. TSAP V3.5. Computer program for tree-ring analysis and presentation. Heidelberg: Frank Rinn Distribution, 1996. 264 p.
- Rudaya N., Nazarova L., Novenko E., Andreev A., Kalugin I., Daryin A., Shilov P. Reconstructions of mid-to late holocene climate and vegetation in the north-eastern alтай mountains recorded in lake Teletskoye // *Journ. of Global and Planetary Change*. 2016. V. 141. P. 12–24. doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.04.002.
- Solomina O., Bushueva I., Dolgova E., Jomelli V., Alexandrin M., Mikhaleenko V., Matskovsky V. Glacier variations in the Northern Caucasus compared to climatic reconstructions over the past millennium // *Journ. of Global and Planetary Change*. 2016. V. 140. P. 28–58. doi: 10.1016/j.gloplacha.2016.02.008.
- Solomina O.N., Bradley R.S., Jomelli V., Geirsdottir A., Kaufman D.S., Koch J., McKay N.P., Masiokas M., Miller G., Nesje A., Nicolussi K., Owen L.A., Putnam A.E., Wanner H., Wiles G., Yang B. Glacier fluctuations during the past 2000 years // *Quaternary Science Review*. 2016. V. 149. P. 61–90. doi: 10.1016/j.quascirev.2016.04.008.
- Trenborth H.E., Matthews J.A. Lichen growth rates on glacier forelands in southern Norway: preliminary results from a 25-year monitoring program // *Journ. of Geografiska Annaler*. 2010. V. 92. P. 19–39. doi.org/10.1111/j.1468-0459.2010.00375.x.
- Villalba R., Leiva J.C., Rubulls S., Suarez J., Lenzano L. Climate, tree-ring, and glacial fluctuations in the Rio Frias Valley, Rio Negro, Argentina // *Journ. of Arctic and Alpine Research*. 1990. V. 22 (3). P. 215–232. doi: 10.2307/1551585.
- Young N.E., Briner J.P., Kaufman D.S. Late Pleistocene and Holocene glaciation of the Fish Lake valley, northeastern Alaska Range, Alaska // *Journ. of Quatern. Science*. 2009. V. 24. P. 677–689. doi.org/10.1002/jqs.1279.
- Holmes R.L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-ring bulletin*. 1983, 44: 69–75.
- Holzhauser H., Magny M., Zumbühl H. J. Glacier and lake-level variations in west-central Europe over the last 3500 years. *Journ. of Holocene*. 2005, 15 (6): 789–801. doi.org/10.1191/0959683605hl853ra.
- Innes J.L. Lichenometry. *Successes of Physic. Geogr.* 1985, 9: 187–254.
- Jomelli V., Grancher D., Naveau P., Cooley D., Brunstein D. Assessment study of lichenometric methods for dating surfaces. *Journ. of Geomorphol.* 2007, 86 (1–2): 131–143. doi:10.1016/J.geomorph.2006.08.010.
- Locke W.W., Andrews J.T., Webber P.J. Guide to lichenometry. Technical Bulletin of the British Geomorphology Research Group. 1979, 26: 47 p.
- Luckman B.H. The little ice age in the Canadian Rockies. *Journ. of Geomorphol.* 2000, 32 (3–4): 357–384. doi:10.1016/S0169-555X(99)00104-X.
- Menounos B., Maurer L., Clague J.J., Osborn G. Late Holocene fluctuations of Stoppani glacier, southernmost Patagonia. *Journ. of Quatern. Research*. 2019, 95: 56–64. doi.org/10.1017/qua.2019.87.
- Osborn G., McCarthy D., La Brie A., Burke R. Lichenometric dating: Science or pseudo-science? *Quatern. Science Rev.* 2015, 83: 1–12. doi:10.1016/j.yqres.2014.09.006.
- Rinn F. TSAP V3.5. Computer program for tree-ring analysis and presentation. Heidelberg: Frank Rinn Distribution, 1996: 264 p.
- Rudaya N., Nazarova L., Novenko E., Andreev A., Kalugin I., Daryin A., Shilov P. Reconstructions of mid-to late holocene climate and vegetation in the north-eastern alтай mountains recorded in lake Teletskoye. *Journ. of Global. and Planet. Change*. 2016, 141: 12–24. doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.04.002.
- Solomina O., Bushueva I., Dolgova E., Jomelli V., Alexandrin M., Mikhaleenko V., & Matskovsky V. Glacier variations in the Northern Caucasus compared to climatic reconstructions over the past millennium. *Journ. of Global. and Planet. Change*. 2016, 140: 28–58. doi:10.1016/j.gloplacha.2016.02.008.
- Solomina O.N., Bradley R.S., Jomelli V., Geirsdottir A., Kaufman D.S., Koch J., Mackay N.P., Masiokas M., Miller G., Nesier A., Nicolussi K., Owen L.A., Putnam A.E., Wanner H., Wiles G., Yang B. Glacier fluctuations over the last 2000 years. *Quatern. Science Rev.* 2016, 149: 61–90. doi: 10.1016/j.quascirev.2016.04.008.
- Trenborth H.E., Matthews J.A. Lichen growth rates in glacial forests of southern Norway: preliminary results of a 25-year monitoring program. *Journ. of Geografiska Annaler*. 2010, 92: 19–39. doi.org/10.1111/j.1468-0459.2010.00375.x.
- Villalba R., Leiva J.C., Rubulls S., Suarez J., Lenzano L. Climate, tree-ring, and glacial fluctuations in the Rio Frias Valley, Rio Negro, Argentina. *Journ. of Arc. and Alp. Research*. 1990, 22 (3): 215–232. doi: 10.2307/1551585.
- Yang N.E., Briner J. P., Kaufman D.S. Late Pleistocene and Holocene glaciation of the Fish Lake Valley, Northeast ridge of Alaska, Alaska. *Journ. of Quatern. Sciences*. 2009, 24: 677–689. doi.org/10.1002/jqs.1279.