

УДК 630*561.24:581.527.5

8768-ЛЕТНЯЯ ЯМАЛЬСКАЯ ДРЕВЕСНО-КОЛЬЦЕВАЯ ХРОНОЛОГИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ПАЛЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ РЕКОНСТРУКЦИЙ

© 2021 г. Р. М. Хантемиров^{a, b, *}, С. Г. Шиятов^a, Л. А. Горланова^a, В. В. Кукарских^{a, b, c},
А. Ю. Сурков^a, И. Р. Хамзин^b, П. Фонти^d, Л. Вакер^e

^aИнститут экологии растений и животных УрО РАН, Россия 620144 Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202

^bУральский гуманитарный институт Уральского федерального университета,
Россия 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19

^cСибирский федеральный университет, Россия 660041 Красноярск, просп. Свободный, 79

^dШвейцарский федеральный институт изучения леса, снега и ландшафта,
Швейцария СН-8903 Бирмендорф, Цурхерштрассе, 111

^eЛаборатория ионных пучков, Швейцарская высшая техническая школа Цюриха,
Швейцария СН-8093 Цюрих, Отто Штерн Вег, 5

*e-mail: rashit@ipae.uran.ru

Поступила в редакцию 11.01.2021 г.

После доработки 12.04.2021 г.

Принята к публикации 13.04.2021 г.

В последние годы достигнут значительный прогресс в продлении и повышении надежности Ямальской сверхдлительной древесно-кольцевой хронологии. В статье представлена характеристика древесного материала, использованного для построения самой длительной для территории Субарктики абсолютно датированной хронологии по ширине годичных колец лиственницы сибирской протяженностью 8768 лет, охватывающей период с 6748 г. до н.э. по 2019 г. н.э. Обсуждаются экологические аспекты интерпретации распределения интервалов жизни датированных деревьев во времени и их расположения в пространстве. Оценены перспективы применения датированного материала и полученных хронологий в различных областях естественных и гуманитарных наук.

Ключевые слова: древесные кольца, сверхдлительные древесно-кольцевые хронологии, Ямал, полускопаемая древесина, граница леса

DOI: 10.31857/S0367059721050085

Древесно-кольцевые хронологии широко используются для реконструкции различных параметров природной среды. Значимость этих временных рядов определяется, среди прочего, их длительностью. Наивысшую ценность представляют хронологии протяженностью в тысячи лет. До настоящего времени в мире построено совсем немного древесно-кольцевых рядов, охватывающих несколько тысячелетий. Некоторые из них, например формально самая длительная 12460-летняя хронология для Центральной Европы [1] и некоторые другие европейские и североамериканские хронологии [2–4], имеют ограниченное применение и практически не используются для реконструкций условий среды в прошлом. С этой точки зрения более значимы хронологии, которые содержат сильный климатический, например температурный, сигнал.

До настоящего времени в мире построено лишь девять таких древесно-кольцевых рядов длительностью более 2 тыс. лет: 2 в южном полушарии — на юге Чили [5] и в Тасмании [6], 3 — в

северном полушарии за пределами России: в Квебеке [7], Скандинавии [8, 9], австрийских Альпах [10, 11] и 4 — на территории России: на Алтае [12], в северной Якутии [13], на Таймыре [14] и Ямале [15]. Временной охват трех из перечисленных хронологий превышает 7 тыс. лет: Альпийской (около 10050 лет), Скандинавской (7536 лет) и Ямальской.

Цель данной работы — заявить о построении 8768-летней древесно-кольцевой хронологии для Ямала, представить характеристику материала, на основе которой она построена, продемонстрировать примеры ее использования для палеоэкологических реконструкций, а также показать перспективы использования в других областях естественных и гуманитарных наук.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Полуостров Ямал является одним из немногих районов мира, где можно в массовом количестве

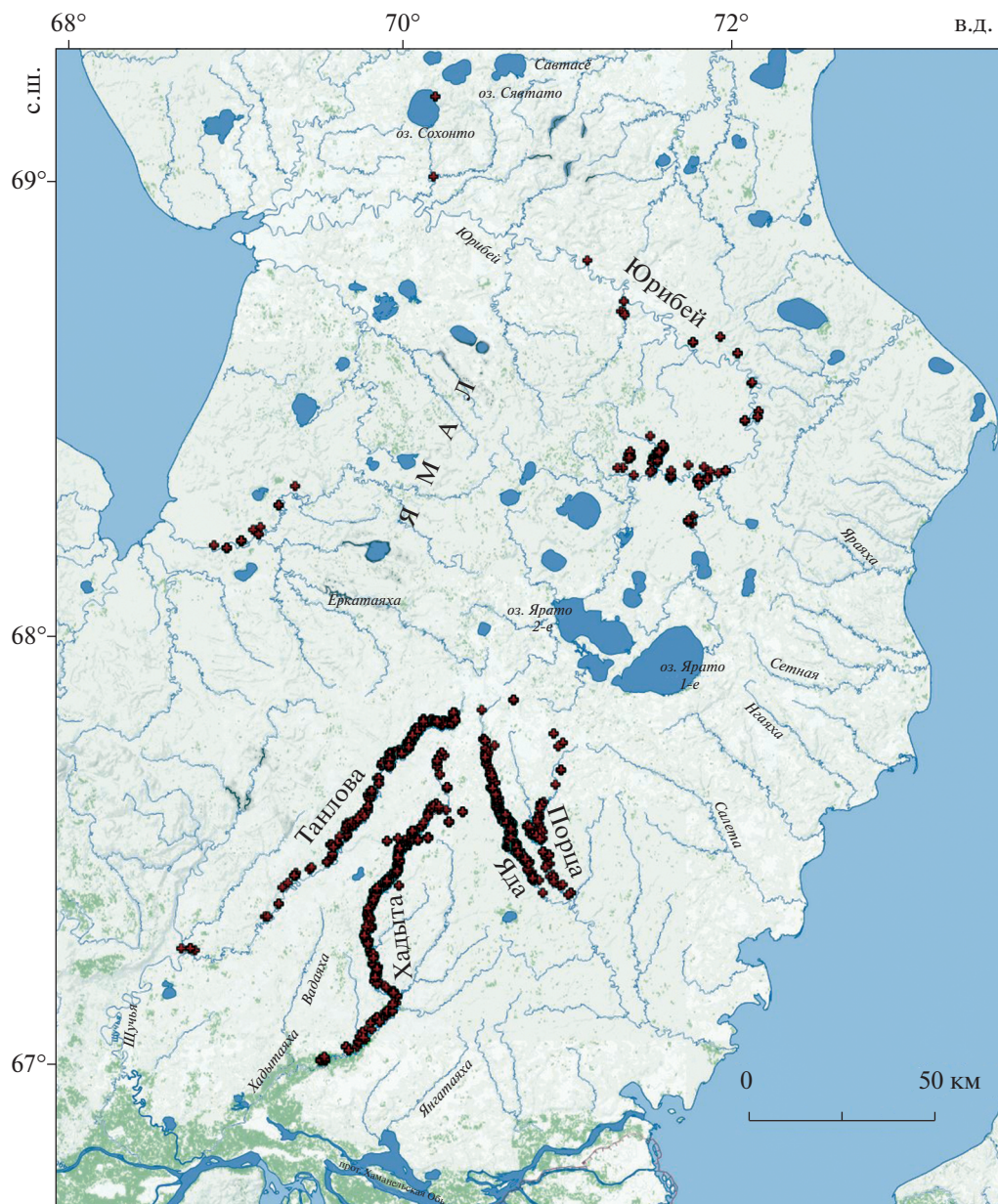


Рис. 1. Места сбора полуископаемой древесины на полуострове Ямал.

найти хорошо сохранившиеся остатки деревьев, погибших тысячелетия назад. Первым возможность использования этого материала для построения длительной древесно-кольцевой хронологии оценил С.Г. Шиятов [16]. В 1964 г. он собрал первые образцы полуископаемой древесины. Систематическая работа по формированию коллекции образцов древней древесины Ямала началась в 1982 г. С тех пор в результате 20 экспедиций взяты спилы с 4800 погибших деревьев. Сбор образцов полуископаемой древесины проводился в южной половине полуострова Ямал (рис. 1). На большей части этой территории леса в настоящее время отсутствуют. Лишь в самой южной части по-

луострова лесная растительность языками вклинивается в глубь тундры примерно до $67^{\circ}30'$ с.ш. по долинам некоторых рек, в среднем течении которых распространены лиственничные и елово-лиственничные редколесья.

Самым важным источником полуископаемых остатков древесины являются аллювиальные отложения. Благодаря интенсивной боковой эрозии песчаных берегов живые деревья, растущие вдоль речных террас, подмываются, падают в потоки воды и замываются песком и илом. Русло меняется, замываемые деревья вскоре оказываются вдали от реки в слоях многолетней мерзлоты. Они могут быть обнажены той же рекой, когда ее рус-

ло вновь вернется на это место, но уже углубившись. Другим источником полуископаемой древесины служат торфяники, размываемые реками или озерами. Несколько образцов были собраны вдали от речных долин с выдавленных из мерзлоты стволов. Вероятно, они тоже были захоронены в торфяниках. Кроме того, остатки погибших деревьев можно найти на Ямале на дневной поверхности *in situ*.

Наибольшую долю в сборах полуископаемой древесины составляет лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.) – 91% от собранных образцов, 6.2% образцов определены как остатки ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.), 2.7% – березы извилистой (*Betula pubescens* ssp. *tortuosa* (Ledeb.) Nyman) и 0.1% – ольховника (*Alnus alnobetula* subsp. *fruticosa* (Rupr.) Raus).

Ширину годовичных колец полуископаемой древесины, собранной до 1993 г., измеряли под бинокулярным микроскопом с точностью от 0.025 до 0.015 мм, позднее – на полуавтоматических приборах для определения размерных характеристик древесных колец с точностью 0.01 мм. К настоящему времени измерена ширина годовичных колец у 3800 образцов, собранных главным образом со стволов полуископаемых деревьев, изредка с корневых лап.

Построение хронологии проводилось методом перекрестной датировки [17]. На первом этапе перекрестно датировали индивидуальные хронологии по полуископаемой древесине с мастер-хронологией по живым деревьям длительностью около 300 лет. В результате была получена более длительная обобщенная хронология, совмещающая данные по живым деревьям и отмершей древесине. Затем процедуру перекрестной датировки со всеми оставшимися образцами последовательно повторяли, каждый раз используя новую удлиненную хронологию. При построении “плавающих” хронологий выбирали индивидуальные хронологии неизвестного возраста, которые содержали большое число колец и у которых вероятность выпадения колец была минимальна. Хронологии по таким образцам использовали в качестве временных мастер-хронологий. Приблизительную привязку плавающих хронологий к календарному времени проводили с помощью радиоуглеродных датировок. Всего в разное время радиоуглеродным методом было датировано 166 образцов полуископаемой древесины Ямала: 53 из них – в ИЭРиЖ УрО РАН и Бернском университете [18], 113 – в лаборатории физики ионных пучков в Высшей технической школе Цюриха (13 образцов АМС методом, 100 образцов методом speed dating [19]).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Абсолютная и плавающая хронологии

К настоящему времени построена абсолютная хронология, охватывающая период с 6748 г. до н.э. по 2019 г. н.э. Период с 6671 г. до н.э. обеспечен 3 и более образцами. Представленная на рис. 2 версия хронологии получена на основе индивидуальных рядов по ширине годовичных колец лиственницы сибирской. При построении хронологии были исключены образцы с корневых лап и образцы, которые имели повреждения, приводящие к искажению изменчивости ширины годовичных колец, а также образцы, у которых наблюдались длительные периоды угнетения прироста, что затрудняло точную датировку части колец на спиле. Индексирование индивидуальных рядов проводили с помощью 50-летнего кубического сплайна в программе ARSTANL [20]. Важно подчеркнуть, что этот метод не позволяет выявлять вековые и сверхвековые колебания прироста, поэтому применение представленной версии хронологии ограничено целями датирования.

Кроме того, на основе данных по ширине годовичных колец 14 деревьев построена плавающая хронология длительностью 337 лет. Радиоуглеродные датировки двух образцов, входящих в эту плавающую хронологию, позволяют приблизительно, с неопределенностью примерно в 70 лет, оценить ее календарные даты с 7080 г. по 6744 г. до н.э. Период длительностью 216 лет – примерно с 6996 г. по 6781 г. до н.э. – обеспечен 3 и более образцами (см. рис. 2). Возможно, плавающая хронология перекрывается с абсолютной, но длительности перекрытия пока не хватает для перекрестной датировки этих хронологий.

Характеристика измеренных и датированных образцов

В среднем каждый измеренный образец имеет 125 колец, но распределение смещено в сторону меньшего числа колец (рис. 3), медиана составляет 110 колец, 44% образцов имеют 100 колец и менее. С помощью абсолютной хронологии датирован 2071 образец полуископаемой древесины. Если учесть 14 образцов плавающей хронологии, это составит около 55% деревьев, у которых измерена ширина годовичных колец. Большинство из оставшихся 45% образцов не датированы по причине небольшого числа колец. Доля датированных образцов увеличивается в выборках с большим числом колец.

Доля ели и березы среди датированных образцов немного меньше, чем в общей выборке собранных образцов (3.9 и 0.6% соответственно). По-видимому, это связано с тем, что абсолютная хронология построена на основе данных по лиственнице, которая может иметь некоторые осо-

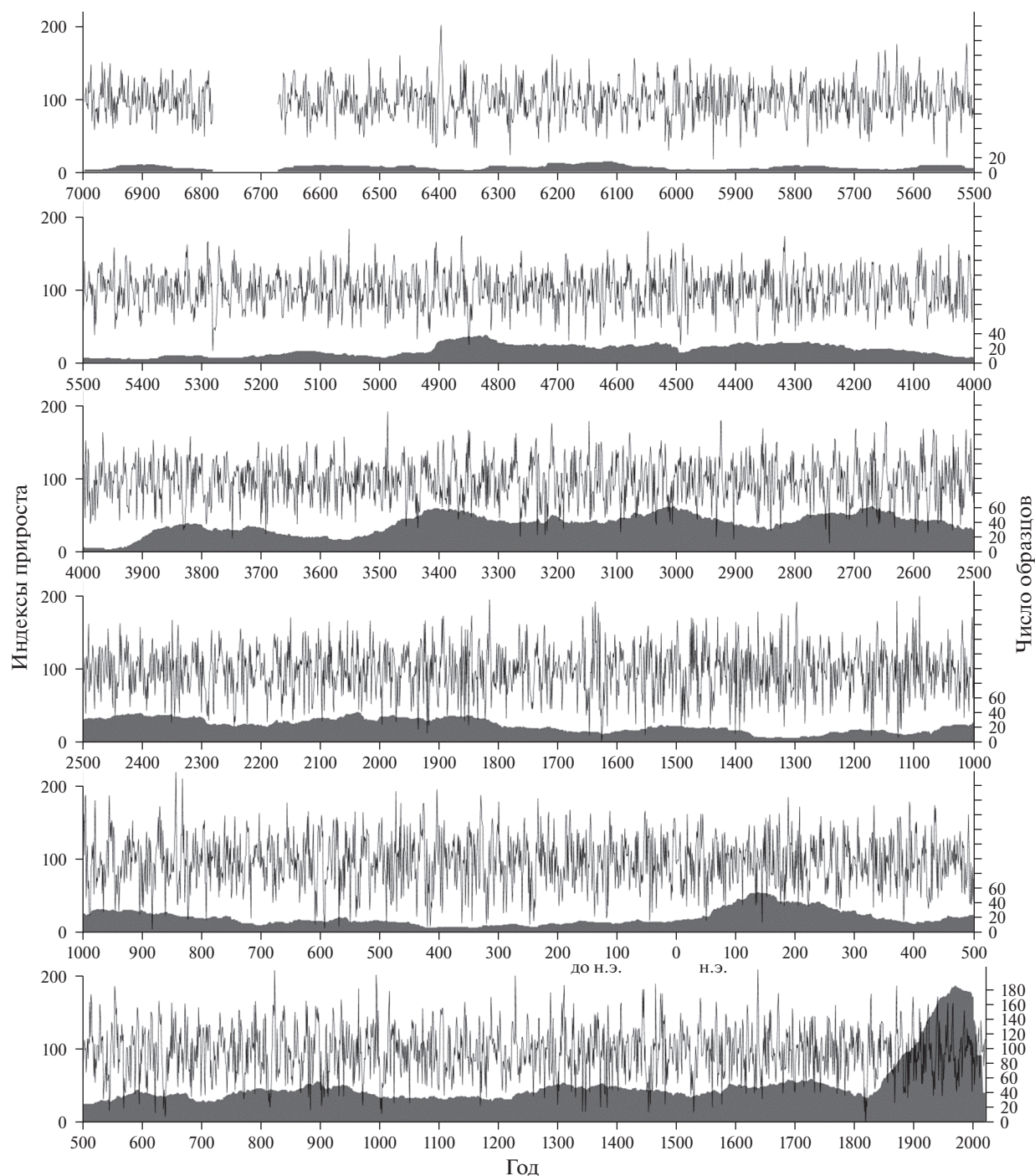


Рис. 2. Ямальская сверхдлительная хронология. Показаны периоды, обеспеченные 3 образцами и более. Использован метод индексирования, позволяющий выявлять только высокочастотные колебания прироста.

бенности радиального прироста даже в условиях общего для всех древесных видов лимитирующего фактора, а именно температуры периода вегетации.

Распределение датированных деревьев во времени имеет особенности в зависимости от района сбора материала (рис. 4). Образцами, со-

бранными в долине р. Яда, полностью и относительно равномерно покрывается весь период хронологии. В долине р. Хадьта высока доля деревьев, росших в последние 1.5–2 тысячелетия. В долине р. Танлова больше представлены деревья, произраставшие 4–7 тыс. лет назад, севернее 68° с.ш. отсутствуют находки для последних 4400 лет.

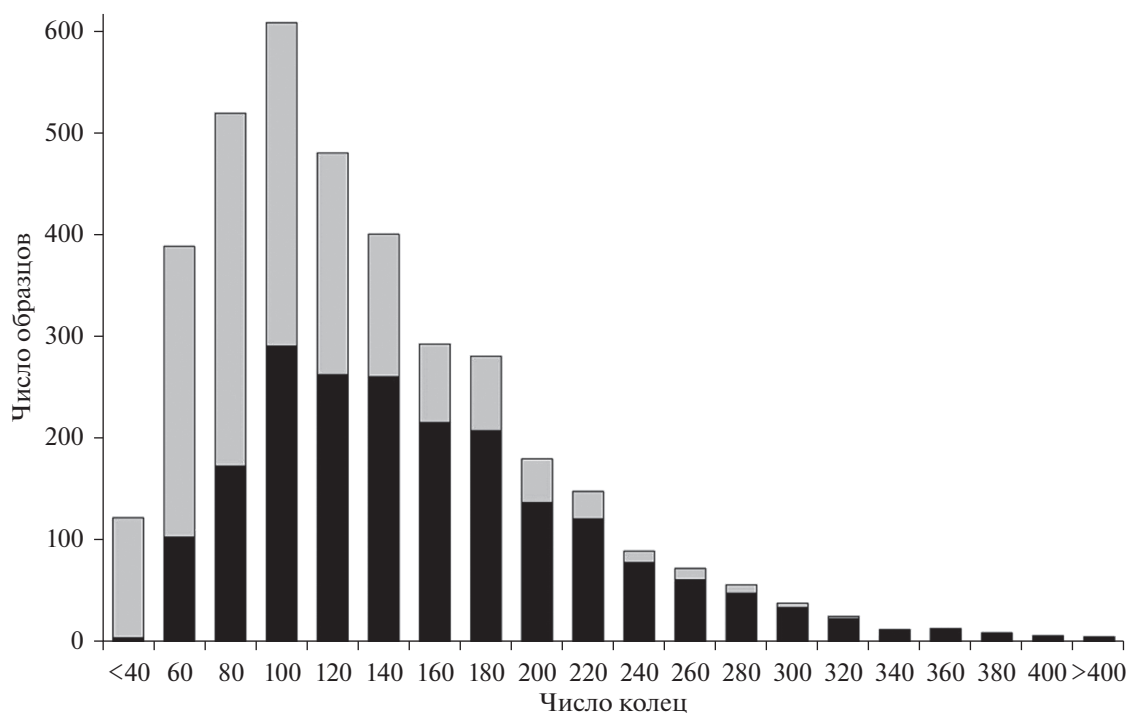


Рис. 3. Распределение числа колец в измеренных образцах полуископаемой древесины и доля сдатированных (темная часть столбиков) образцов.

Большинство сдатированных образцов (2023 шт.) происходят из аллювиальных отложений. Данные по этим образцам полностью покрывают весь интервал абсолютной и плавающей хронологии (рис. 5б). Из торфяных отложений сдатировано 34 образца. Они покрывают большую часть плавающей хронологии, а также с пробелами часть абсолютной хронологии с 6209 г. по 3872 г. до н.э. Еще 5 сдатированных образцов были собраны вдали от речных долин с выдавленными из мерзлоты стволов, предположительно из торфяников — интервалы их жизни распределены с 5135 г. до 4734 г. до н.э. Из образцов, собранных на дневной поверхности *in situ*, сдатировано 23, большая часть из которых погибла в последние 300 лет. Сохранились остатки одного дерева, погибшего в 1307 г.

Благодаря тому, что географические координаты каждой находки полуископаемой древесины были зафиксированы, удалось представить интервалы жизни отдельных деревьев, распределенных вдоль широтного градиента (рис. 5а).

ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика полярной границы леса на Ямале

При интерпретации рис. 5а следует иметь в виду, что место находки полуископаемого остатка дерева в аллювиальных отложениях может немного не совпадать с местом его произрастания.

Причиной является перенос подмытого ствола водным потоком вниз по реке перед его захоронением или переотложение захороненных остатков. По нашим наблюдениям, дальность такого переноса не превышает нескольких десятков или первых сотен метров, и только в редких случаях возможен перенос дерева на несколько километров вниз по реке. Транспортировка деревьев течением реки может внести ошибку в оценку положения северной границы леса. Но в нашем случае это справедливо только для территории севернее 68° с.ш. Реки Ямала южнее этой широты текут с севера на юг (см. рис. 1), поэтому занос плавника по направлению с юга на север полностью исключен.

На рис. 5а хорошо заметно смещение границы леса на юг в 3-м тысячелетии до н.э. Последнее из найденных нами севернее 68° с.ш. деревьев погибло в 2419 г. до н.э. Это отступление сопровождалось снижением числа деревьев, которое началось примерно в 2550 г. до н.э. и продолжалось до 2250 г. до н.э. (см. рис. 5б). Последняя дата совпадает с переходом от северогриппианского (Northgripian) периода голоцена к мегхалайскому (Meghalayan) — около 4200 лет назад (около 2250 г. до н.э.) [21]. Но смещение границы леса на юг на этом не остановилось и продолжалось еще несколько столетий. В период с 1650 г. по 1500 г. до н.э. полярная граница леса отступила еще ориентировочно на 20 км, примерно до современного ее положения.

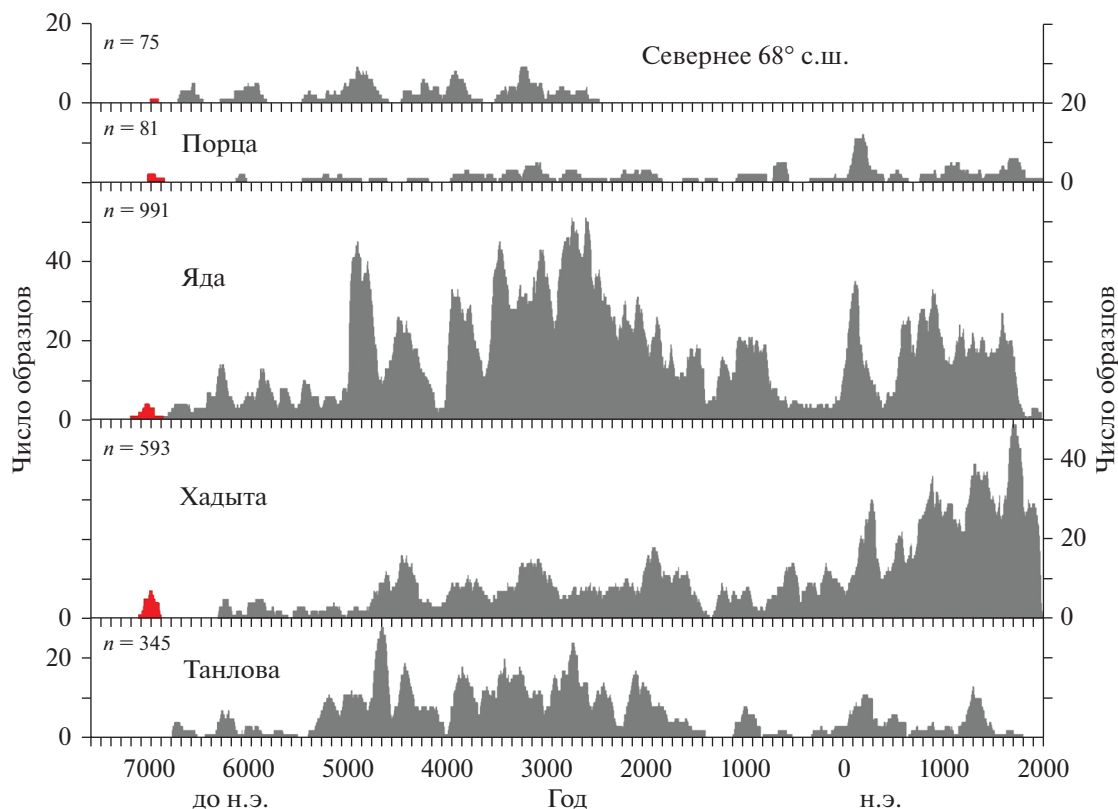


Рис. 4. Распределение во времени числа образцов, собранных в долинах разных рек в южной части полуострова Ямал (включая близлежащие озера вне долин). Красным цветом отмечены образцы, датированные с “плавающей” хронологией.

Однако при отступании на юг в отдельных, видимо, особенно благоприятных местообитаниях небольшие группы деревьев могли сохраняться на 10–15 км севернее полярной границы распространения редколесий вдоль долин рек в течение 200–500 лет. Находки единичных (5 шт., все в долине р. Танлова) деревьев на удалении более 10 км к северу от основного массива датированных для этого времени образцов свидетельствуют о наличии небольших рефугиумов лесной растительности. Наличием таких мест переживания неблагоприятных климатических условий можно объяснить очень быстрое смещение границы редколесий на север в XX в. после значительного ее отступления в начале XIX в. Так, на р. Яда в группе самых северных ныне растущих деревьев была обнаружена лиственница, появившаяся в начале XIX в., т.е. граница отдельных деревьев в последние два столетия практически не менялась, в то время как граница редколесий в XIX в. н.э. была гораздо южнее ее нынешнего положения [22].

На благоприятные для роста деревьев условия в тот или иной период наряду с высоким числом найденных образцов может указывать наличие остатков деревьев, извлеченных из-под торфяников. Это свидетельство того, что деревья занима-

ли тогда не только долины рек, но и плакорные местообитания (50–60 м над ур. м.), которые менее благоприятны для произрастания древесной растительности по сравнению с долинными. К таким периодам можно отнести интервал, покрываемый плавающей хронологией, которая построена большей частью на основе данных деревьев из торфяников, а также периоды с 6200 по 5300 г. и с 5150 по 4500 г. до н.э.

Если продолжить сравнение с формальным делением голоцена на периоды, то переход от гренландского (Greenlandian) к северогриппианскому периоду около 8200 лет назад (около 6250 г. до н.э.), согласно нашим данным, не отмечен каким-либо заметным событием. Возможно, на это время приходится первый значительный сдвиг границы леса на юг, который, согласно взглядам, основанным на данных радиоуглеродных датировок полускопаемой древесины [18], был на Ямале около 7400 лет назад. Для уточнения датировки этого сдвига необходимы массовые сборы полускопаемой древесины севернее 69° с.ш.

Определенный палеогеографический интерес представляют данные о “южной” границе распространения деревьев вдоль долин рассматриваемых рек. Она, очевидно, определяется степенью

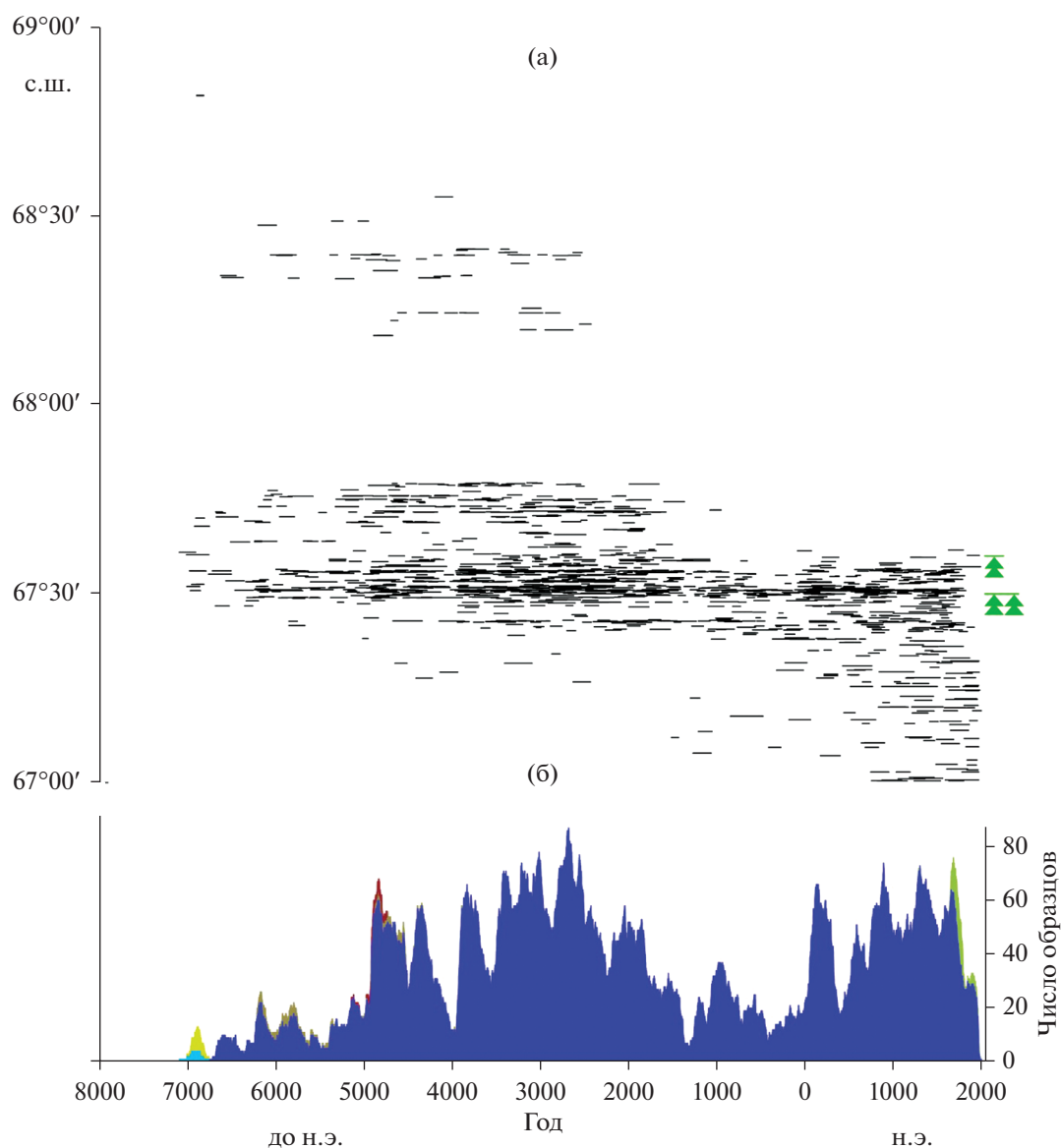


Рис. 5. Интервалы жизни отдельных полуископаемых деревьев, распределенные в соответствии с положением по географической широте (а) и распределение во времени числа этих деревьев (б). В части (а) зеленые символы обозначают широту расположения самых северных деревьев (верхний символ) и самых северных редколесий (нижний символ) в долинах рек в настоящее время. В части (б) синей заливкой показаны деревья из аллювиальных отложений, бурой — из торфяников, зеленой — на поверхности.

затопления устья и нижнего течения р. Хадыта, где были собраны самые южные образцы (см. рис. 1). После снижения уровня реки там стали произрастать деревья, преимущественно в последние 1500 лет. Возможно, снижение уровня воды произошло из-за обмеления и высыхания озер в верховьях реки и ее притоков. Этот процесс заметен и в последние десятилетия (личные наблюдения). Не исключено, что изменение уровня реки связано с морскими трансгрессиями. Если принять это предположение, то 7–9 тыс. лет назад уровень моря был выше современного и постепенно снижался. Разница в абсолютной высоте уровня реки

между широтой, где примерно проходила “южная” граница распространения деревьев до 1500 г. до н.э., и широтой, где найдены самые южные остатки погибших деревьев в более позднее время, составляет порядка 10 м.

Время появления древесной растительности на Ямале и возможность продления хронологии

Радиоуглеродные датировки полуископаемой древесины из северных районов Ямала свидетельствуют о том, что уже в начале голоцена, не позднее 10 тыс. лет назад, полуостров был почти

полностью покрыт лесом [18, 23]. Однако в соответствии с данными о возможной [24] и реальной [22] скорости продвижения хвойных деревьев на север облесение Ямала не могло произойти в относительно короткие, 1–2 тысячелетия, сроки в начале голоцена. Видимо, редколесья или отдельные деревья сохранялись на полуострове и в позднем плейстоцене. Об этом свидетельствуют данные радиоуглеродной датировки методом *speed dating* одного из полуископаемых образцов, найденных нами в верховьях р. Танловы, который имеет возраст, близкий к пределу обнаружения методом, т.е. более 40 тыс. лет (ЕТН-103244). Примерно того же возраста, согласно данным [25], были древесные остатки, найденные на острове Белый, у северной оконечности полуострова Ямал. На Гыданском полуострове, восточнее Ямала, севернее 72° с.ш. в желудке мамонта, возрастом около 18 тыс. лет, были обнаружены ветки лиственницы [26]. Датировка этих веток АМС методом, проведенная в лаборатории физики ионных пучков в Высшей технической школе Цюриха, дала еще более ранний радиоуглеродный возраст — 46098 ± 924 лет (ЕТН-102854).

Таким образом, есть основания полагать, что отдельные деревья могли произрастать на полуострове Ямал в позднем плейстоцене. Учитывая, что среднегодовые температуры были в ту эпоху намного ниже современных [27], остается допустить, что климат был гораздо более континентальным, и низкие среднегодовые температуры объяснялись главным образом суровыми зимними, а не летними, условиями.

Наличие на полуострове Ямал древесины возрастом в несколько десятков тысяч лет не означает, что возможно построение непрерывной хронологии такой длительности. Находки плейстоценовой древесины крайне редки. Реальным на сегодняшний день является продление абсолютной хронологии еще на 300–400 лет, т.е. до 7050–7150 гг. до н.э., за счет соединения ее с ближайшей плавающей хронологией. Продление хронологии далее в глубь веков проблематично.

Из датированных радиоуглеродным методом 166 образцов у 6 откалиброванных возраст оказался выше 9000 лет (не считая плейстоценовых образцов) — в интервале от 7535 г. до 7060 г. до н.э. Из них 4 возможно попадают в интервал плавающей хронологии, но пока не датируются с ней, в частности из-за малого числа колец. Построение новых плавающих хронологий на основе двух образцов более старого возраста — 7535 ± 180 г. до н.э. (ЕТН-103209) и 7430 ± 350 г. до н.э. (ЕТН-103145) (калиброванные даты) — затруднительно, так как они тоже содержат малое число колец — 67 и 57 соответственно. Поэтому создание непрерывной хронологии длительностью около 9500 лет, скорее, возможно только в отдаленной перспективе.

Заявлять о большей длительности пока нет оснований.

Перспективы использования Ямальской сверхдлительной хронологии

Хронология является превосходным инструментом при выполнении реконструкций различных параметров природной среды в прошлом. В первую очередь хронология по ширине годичных колец содержит сильный климатический сигнал [28] — с ее помощью можно с точностью до года реконструировать различные показатели температуры воздуха летних сезонов. Выполнение реконструкции требует особого подхода к выбору образцов и методам индексирования первичных данных. Для обеспечения гомогенности хронологии необходимо ограничиться одним древесным видом и относительно небольшой территорией, с которой собраны образцы, т.е. ограничиться данными по лиственнице, собранной в интервале от 67° до 68° с.ш. Для сохранения информации о сверхвековых климатических колебаниях необходимо применять методы индексирования, основанные на использовании региональных кривых, что в свою очередь требует высокого обеспечения образцами — не менее 10–15 на каждый год реконструкции. К настоящему времени этим условиям отвечает не весь период, охватываемый хронологией.

С помощью анализа таких аномальных анатомических структур, как морозобойные, ложные и светлые кольца, можно проводить реконструкции экстремальных температурных событий, некоторые из которых являются индикаторами крупных вулканических извержений [29].

Многообещающим является анализ клеточной структуры древесных колец, с помощью которого можно реконструировать климатические показатели, которые сложно или невозможно выполнить с использованием ширины годичных колец.

Как было показано выше, с помощью хронологии можно проводить массовые и очень точные датировки времени жизни деревьев, остатки которых сохранились в аллювиальных и торфяных отложениях и на поверхности. Такие датировки позволяют провести реконструкцию динамики различных параметров древесной растительности: положения северной границы редколесий, соотношения древесных видов, густоты и возрастной структуры древостоев и т.д. [15, 30]. Ни один из известных в настоящее время методов не может обеспечить такую массовую и точную датировку древесных остатков.

Древесина точно датированных колец может найти применение при построении калибровочных радиоуглеродных кривых. В последние годы планируются и начались серьезные инициативы

по построению калибровочной кривой с шагом в один год с использованием материала из разных регионов земного шара [31].

Наконец, с помощью хронологии можно датировать практически для всего периода голоцена археологические памятники Ямала, в которых сохранились остатки древесины с ненарушенной структурой годовичных колец [32, 33].

Таким образом, 8768-летняя хронология, построенная на основе данных по ширине годовичных колец полуископаемых деревьев Ямала, самая длительная для приполярных районов земли, является уникальным инструментом для проведения реконструкции различных параметров природной среды в течение голоцена.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-05-00575). П. Фонти благодарит за финансовую поддержку Швейцарский научный фонд (проект “CALDERA” № CRSII5_183571).

Авторы выражают благодарность В.С. Мазепе, И.А. Суркову и всем другим участникам сборов полуископаемой древесины на Ямале.

Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Friedrich M., Remmele S., Kromer B. et al. The 12460-year Hohenheim oak and pine tree-ring chronology from Central Europe—A unique annual record for radiocarbon calibration and paleoenvironment reconstructions // *Radiocarbon*. 2004. V. 46. № 3. P. 1111–1122.
2. Brown D.M., Munro M.A.R., Baillie M.G.L., Pilcher J.R. Dendrochronology – the absolute Irish standard // *Radiocarbon*. 1986. V. 28. № 2A. P. 279–283.
3. Brown D.M., Baillie M.G.L. Construction and dating of a 5000 year old English bog oak tree-ring chronology // *Lundqua Report*. 1992. V. 34. P. 72–75.
4. Ferguson C.W., Graybill D.A. Dendrochronology of Bristlecone pine: a progress report // *Radiocarbon*. 1983. V. 25. № 2. P. 287–288.
5. Lara A., Villalba R., Urrutia-Jalabert R. et al. A 5680-year tree-ring temperature record for southern South America // *Quat. Sci. Rev.* 2020. V. 228. P. 106087. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.106087>
6. Cook E.R., Buckley B.M., Palmer J.G. et al. Millennial-long tree-ring records from Tasmania and New Zealand: a basis for modelling climate variability and forcing, past, present and future // *J. Quat. Sci.* 2006. V. 21. № 7. P. 689–699. <https://doi.org/10.1002/jqs.1071>
7. Gennaretti F., Arseneault D., Nicault A. et al. Volcano-induced regime shifts in millennial tree-ring chronologies from northeastern North America // *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 2014. V. 111. № 28. P. 10077–10082. <https://doi.org/10.1073/pnas.1324220111>
8. Grudd H., Briffa K.R., Karlén W. et al. A 7400-year tree-ring chronology in northern Swedish Lapland: natural climatic variability expressed on annual to millennial timescales // *The Holocene*. 2002. V. 12. № 6. P. 657–665. <https://doi.org/10.1191/0959683602hl578rp>
9. Helama S., Mielikäinen K., Timonen M., Eronen M. Finnish supra-long tree-ring chronology extended to 5634 BC // *Nor. Geogr. Tidsskr.* 2008. V. 62. № 4. P. 271–277. <https://doi.org/10.1080/00291950802517593>
10. Nicolussi K., Kaufmann M., Melvin T.M. et al. A 9111 year long conifer tree-ring chronology for the European Alps: A base for environmental and climatic investigations // *Holocene*. 2009. V. 19. № 6. P. 909–920. <https://doi.org/10.1177/0959683609336565>
11. Nicolussi K., Leuenberger M., Schlüchter C. et al. Tree-ring analyses on Holocene climate variability in the Alps – from single years to millennia // *ICLEA Final Symposium 2017: Climate Change, Human Impact and Landscape Evolution in the Southern Baltic Lowlands. Abstract Volume & Excursion Guide*. GFZ Scientific Technical Report STR17/03 / Eds. Schwab M. et al. 2017. P. 124–126. <https://doi.org/10.2312/GFZb103-17037>
12. Назаров А.Н., Мыглан В.С. Перспективы построения 6000-летней хронологии по сосне сибирской для территории Центрального Алтая // *J. Sib. Fed. Univ. Biol.* 2012. V. 5. № 1. P. 70–88.
13. Sidorova O., Naurzbaev M.M., Vaganov E.A. An integral estimation of tree ring chronologies from subarctic regions of Eurasia // *Proc. TRACE*. 2005. V. 4. P. 84–92.
14. Naurzbaev M.M., Vaganov E.A., Sidorova O.V., Schweingruber F.H. Summer temperatures in eastern Taimyr inferred from a 2427-year late-Holocene tree-ring chronology and earlier floating series // *The Holocene*. 2002. V. 12, № 6. P. 727–736. <https://doi.org/10.1191/0959683602hl586rp>
15. Хантемиров Р.М., Шиятов С.Г. A continuous multimillennial ring-width chronology in Yamal, northwestern Siberia // *The Holocene*. 2002. V. 12. № 6. P. 717–726. <https://doi.org/10.1191/0959683602hl585rp>
16. Шиятов С.Г., Сурков А.Ю. Возможности и перспективы построения сверхдлительных дендрохронологических рядов для Приобского Севера // *Проблемы дендрохронологии и дендроклиматологии: Тез. докл. V Всесоюзного совещания по вопросам дендрохронологии*. Свердловск, 1990. С. 168–169.
17. Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В. и др. Методы дендрохронологии. Ч. I. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации: Учебно-методическое пос. Красноярск: КРАСГУ, 2000. 80 с.
18. Хантемиров Р.М., Шиятов С.Г. Основные этапы развития древесной растительности на Ямале в голоцене // *Экология*. 1999. № 3. С. 163–169. [Хантемиров Р.М., Шиятов С.Г. Main stages of woody vegetation development in the Yamal Peninsula in the Holocene // *Russ. J. Ecol.* 1999. V. 30. № 3.]
19. Sookdeo A., Wacker L., Fahrni S. et al. Speed Dating: A Rapid Way to Determine the Radiocarbon Age of Wood by EA-AMS // *Radiocarbon*. 2017. V. 59. № 3. P. 933–939. <https://doi.org/10.1017/RDC.2016.76>

20. Cook E.R., Holmes R.L. ARSTAN: Chronology development // The international tree-ring data bank program library, version 2.1 user's manual. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson, Arizona, USA, 1997. P. 75–87.
21. Walker M.J.C., Berkelhammer M., Björck S. et al. Formal subdivision of the Holocene Series/Epoch: a Discussion Paper by a Working Group of INTIMATE (Integration of ice-core, marine and terrestrial records) and the Subcommission on Quaternary Stratigraphy (International Commission on Stratigraphy) // J. Quat. Sci. 2012. V. 27. № 7. P. 649–659. <https://doi.org/10.1002/jqs.2565>
22. Хантемиров Р.М., Сурков А.Ю., Горланова Л.А. Изменения климата и формирование возрастных поколений лиственницы на полярной границе леса на Ямале // Экология. 2008. № 5. С. 323–328. [Hantemirov R.M., Surkov A.Y., Gorlanova L.A. Climate changes and overstory recruitment of larch at the northern timberline in the Yamal Peninsula // Russ. J. Ecol. 2008. V. 39. № 5. P. 305–309. <https://doi.org/10.1134/S1067413608050019>]
23. Васильчук Ю.К., Петрова Е.А., Серова А.К. Некоторые черты палеогеографии голоцена Ямала // Бюлл. комиссии по изучению четвертичного периода. 1983. № 52. С. 73–89.
24. Шиятов С.Г. Время рассеивания семян лиственницы сибирской в северо-западной части ареала и роль этого фактора во взаимоотношении леса и тундры // Вопросы физиологии и геоботаники / Зап. Свердловского отд. ВБО. 1966. № 4. С. 109–113.
25. Слагода Е.А., Симонова Г.В., Тихонравова Я.В. и др. Радиоуглеродное датирование многолетнемерзлых отложений острова Белый, Карское море // Криосфера Земли. 2018. Т. XXII. № 4. С. 3–14. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-4\(3-14\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-4(3-14))
26. Kosintsev P.A., Lapteva E.G., Korona O.M., Zanina O.G. Living environments and diet of the Mongochen mammoth, Gydan Peninsula, Russia // Quat. Int. Elsevier Ltd and INQUA. 2012. V. 276–277. P. 253–268. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.11.004>
27. Стрелецкая И.Д., Васильев А.А., Облогов Г.Е., Токарев И.В. Реконструкция палеоклимата Российской Арктики в позднем неоплейстоцене–голоцене на основе данных по изотопному составу полигонально-жильных льдов // Криосфера Земли, 2015. Т. XIX. № 2. С. 98–106.
28. Briffa K.R., Melvin T.M., Osborn T.J. et al. Reassessing the evidence for tree-growth and inferred temperature change during the Common Era in Yamalia, northwest Siberia // Quat. Sci. Rev., 2013. V. 72. P. 83–107. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.04.008>
29. Хантемиров Р.М., Горланова Л.А., Сурков А.Ю., Шиятов С.Г. Экстремальные климатические события на Ямале за последние 4100 лет по дендрохронологическим данным // Изв. РАН. Серия географическая. 2011. № 2. С. 89–102.
30. Хантемиров Р.М., Сурков А.Ю. Динамика древесной растительности на полуострове Ямал в голоцене // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. Вып. 1(64): Материалы по изучению биоты и экологических проблем ЯНАО. Салехард: Красный Север, 2010. С. 26–39.
31. Bayliss A., Marshall P., Dee M.W. et al. IntCal20 Tree Rings: An Archaeological Swot Analysis // Radiocarbon. 2020. V. 62. № 4. P. 1045–1078. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.77>
32. Шиятов С.Г., Хантемиров Р.М. Дендрохронологическая датировка древесины кустарников из археологического поселения Ярте VI на полуострове Ямал // Древности Ямала. Екатеринбург–Салехард: УрО РАН, 2000. С. 112–120.
33. Хантемиров Р.М., Шиятов С.Г. Дендрохронологические датировки древесины из археологического памятника Усть-Полуй // Археология Арктики: Мат-лы междун. научно-практич. конф., посвященной 80-летию открытия памятника археологии “Древнее святилище Усть-Полуй”. Екатеринбург: Изд-во “Деловая пресса”, 2012. С. 62–64.