

УДК 630*182:581.5

А.А. Бердникова¹, Е.А. Долгова², Р.Н. Курбанов³

ДЕНДРОКЛИМАТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСНЫ КУЛУНДИНСКОЙ КАЗАХСКОГО МЕЛКОСОПОЧНИКА

Территория Казахстана представляет собой белое пятно на карте дендрохронологических исследований. Впервые для двух ключевых участков – Каркаралинского горного массива и массива Кент – по шести опытным площадкам проанализировано 140 образцов сосны обыкновенной кулундинской (*Pinus sylvestris* ssp. *kulundensis*). Это дерево обладает хорошей чувствительностью, необходимой для построения древесно-кольцевых хронологий и их сопоставления с климатическими параметрами. Построена древесно-кольцевая хронология по ширине годичных колец, охватывающая период с 1639 по 2015 г. общей продолжительностью 376 лет. Определен абсолютный возраст каждого образца. Выявлена связь особенностей роста деревьев в регионе исследований с климатическими факторами: установлено, что на прирост древесины наиболее заметное воздействие оказывает количество осадков, выпадающее в теплый период года (количество осадков – лимитирующий фактор прироста), климатический отклик на температуры тех же месяцев отрицательный. Для надежной части полученной древесно-кольцевой хронологии (с 1803 г.) выявлены наиболее засушливые годы: 1997, 1984, 1954, 1910, 1899, 1836, 1798; и периоды: с 1973 по 1976, с 1875 по 1879 и с 1806 по 1808 гг. Сопоставление полученной для изученных районов Центрального Казахстана древесно-кольцевой хронологии по ширине годичных колец с эталонной дендрохронологической шкалой по Алтаю обнаруживает наличие общих климатических трендов в регионах начиная со второй половины XIX в. Выполненное исследование доказывает целесообразность применения дендрохронологического метода для более глубокого изучения колебаний климата аридной зоны в предшествующие столетия.

Ключевые слова: Центральный Казахстан, дендрохронология, дендроклиматология, голоцен

Введение. Для реконструкции эволюции природной среды Средней Азии значительный интерес представляет голоценовая история развития ландшафтно-климатических условий Центрального Казахстана. Детально изучить события последних сотен лет современного межледникового позволяет дендрохронологический метод, использование которого обусловлено наличием в Центральном Казахстане уникальных памятников природы – островных горных гранитных массивов, поросших реликтовыми соснами.

В пределах данной территории доступно малое количество палеогеографических архивов, позволяющих детально реконструировать события в рамках голоцена. Исследуемый регион в настоящее время изучен фрагментарно. Опубликованные данные демонстрируют расхождения между результатами, полученными разными методами. Имеются обширные работы по геоморфологии и структурной геологии Казахского мелкосопочника [Воскресенский, 1968; Мещеряков, 1972; Сваричевская, 1957, 1965; Щукин, 1983]. Большинство исследований, посвященных изучению колебания климата Казахстана в голоцене, основано на результатах палинологического анализа и абсолютного датирования голоценовых отложений Казахстана и сопредельных районов [Кременецкий с соавт., 1994; Климанов с соавт., 1994; Нигматова, 2002, 2010; Тарасов, 1992;

Rao et al., 2019; Tarasov et al., 1997; Zhang, Feng, 2018]. Среди дендрохронологических материалов встречаются немногочисленные публикации, посвященные Казахскому мелкосопочнику [Григорьев, Карнаухова, 2013, 2014], а также археологическим изысканиям на территории Казахстана [Baigunakov, Sabdenova, 2014; Haruda, 2018; Macklin et al., 2015; Panyushkina et al., 2010; Panyushkina, 2012]. Специальных исследований, посвященных дендрохронологии Казахского мелкосопочника и, в частности, Каркаралинского массива в настоящее время нет. Данная территория представляет собой белое пятно на карте дендрохронологических исследований: отсутствуют даже хронологии продолжительностью в несколько десятилетий. Для того чтобы понять механизмы, которые влияют на выпадение осадков, необходимы долговременные наблюдения за атмосферными процессами и ряды метеорологических данных, которые, к сожалению, здесь непродолжительны и отрывочны. Поэтому дендрохронологические и дендроклиматические реконструкции могут иметь большое значение для палеогеографии этого региона.

В данной работе представлены результаты построения древесно-кольцевых хронологий и их сопоставления с климатическими параметрами восточной части Казахского мелкосопочника. Такие исследования на данной территории проводятся

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, студент-магистр; *e-mail*: alinaberdnikowa@yandex.ru

² Институт географии РАН, отдел гляциологии, ст. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: dolgova@igras.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория новейших отложений и палеогеографии плейстоцена, ст. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: roger.kurbanov@gmail.com

впервые. Определен абсолютный возраст каждого из 140 образцов, выявлена связь особенностей роста деревьев с климатическими факторами, установлены наиболее засушливые годы и периоды.

Природные условия изучаемого района. Район исследований представляет собой восточную часть Карагандинской области. В физико-географическом отношении регион относится к Центральному Казахстану, занимает возвышенную часть Казахского мелкосопочника, местное название которого Сарыарка («желтая спина»). Он относится к цокольным равнинам Центрального Казахстана, ограниченным по периферии плоскими равнинами Тургайского прогиба (на севере, западе и северо-востоке), юга Западной Сибири и Иртышской впадиной. На юго-востоке и юго-западе граница проходит по зоне гор и межгорных впадин Южного Казахстана, на юге – по северному берегу оз. Балхаш. Область главного Балхаш-Иртышского водораздела объединяет горы Каркаралинские, Кувские, Кент, Кызылрай и другие, образующие ландшафт изолированных куполовидных возвышенностей. Абсолютные отметки их меняются от 1000 м до 1565 м (наивысшая точка г. Аксоран горы Кызылрай). Самым высоким изучаемым горным массивом является Каркаралинский (1340 м). Относительные превышения положительных форм рельефа составляют 100–150 м, а в центральной водораздельной полосе вершины возвышаются над долинами на 400–500 м. Из-за глубокого внутриматерикового положения климат изучаемого района континентальный. Его главные черты – крайняя засушливость, малоснежная холодная зима, жаркое лето, небольшое количество атмосферных осадков, интенсивное испарение и частые сильные ветры.

Следуя в основном за географическим распределением поступающего солнечного тепла, средние годовые температуры воздуха последовательно возрастают с севера на юг. Резкие колебания температур наблюдаются не только по сезонам года, но и в течение суток. Наиболее холодным месяцем является февраль (средняя температура колеблется от -16°C до -12°C), хотя в настоящее время отмечается тенденция к смещению «пика холода» на январь. Температура значительно снижается в периоды вторжения арктических воздушных масс. Ее минимум за весь период инструментальных наблюдений (-56°C) зафиксирован всего в нескольких десятках километров к западу от исследуемой территории. Положительная среднемесячная температура наблюдается с апреля по октябрь включительно. Средняя летняя температура колеблется от 16°C до 24°C . Максимальной величины она достигает в конце июля – начале августа. В отдельные дни температура воздуха поднимается до 36°C .

Засушливость – одна из основных особенностей изучаемой территории. Характерное количество осадков для холодного периода года составляет 50–100 мм [Атлас СССР, 1983]. В особо влажные годы на северных склонах гор выпадает до 150 мм. В теплый период года этот показатель увеличивается

до 150–200 мм, редко до 300 мм. Однако инструментальные наблюдения свидетельствуют о том, что количество осадков на рассматриваемой территории составляет в среднем 40–50 мм. Самый влажный месяц – июль, в то время как самый сухой – январь. Режим выпадения осадков является одним из основных факторов, влияющих на рост деревьев. Поэтому вегетационный период начинается ориентировочно с мая, когда отмечается резкое увеличение количества осадков.

В низкорослых областях развиты грубые скелетные почвы под сосновыми лесами. В целом, гранитные массивы слабо затронуты почвообразованием.

Растительность Казахского мелкосопочника относительно бедна и представлена преимущественно ксерофильными видами. Степной ландшафт оживляют сосновые боры на гранитных массивах и озера, низкие террасы которых заняты злаково-разнотравной луговой растительностью или густо поросли кустарниками и тальником. Но современной флоре предшествовали другие типы растительности, которые в своем большинстве к настоящему времени уже исчезли или местами сохранились в виде реликтов. Именно к таким реликтам южносибирской флоры [Сваричевская, 1965] относятся островные сосновые боры изучаемых гранитных массивов (Каркаралинского, Кент и Ку).

Материал и методы исследований. Полевые исследования проведены в Центральном Казахстане на территории Карагандинской области в окрестностях г. Каркаралинск, г. Егиндыбулак и пос. им. Аманжолова. Образцы для дендрохронологического анализа отбирались методом ручного бурения. Всего было отобрано и доставлено в Москву 180 образцов.

Отбор образцов проводился в пределах нескольких участков. Среди них ключевыми для исследования являются участки Каркаралинского массива и массива Кент (рис. 1).

В качестве объекта исследования выбрана сосна обыкновенная кулундинская (*P. sylvestris* ssp. *kulundensis*), так как этот вид преобладает на гранитных массивах Карагандинской области. Важно отметить, что все образцы были отобраны из экземпляров *P. sylvestris* ssp. *kulundensis*, развитых на скалистых склонах, где почвенно-грунтовые условия неблагоприятны для их произрастания.

Образцы по возможности отбирались из деревьев разного возраста. Основная задача состояла в поиске наиболее старых деревьев. Однако кольца у них зачастую значительно мельче, чувствительность древесно-кольцевых хронологий снижена и, кроме того, наблюдается массовое выпадение колец. Все это затрудняет измерение и датировку, а значит и реконструкцию изменений условий среды. Для того чтобы облегчить получение достоверных хронологий, на площадках были также отобраны образцы из молодых и средневозрастных деревьев.

В качестве образцов для дендрохронологического анализа использовались буровые керны из жи-

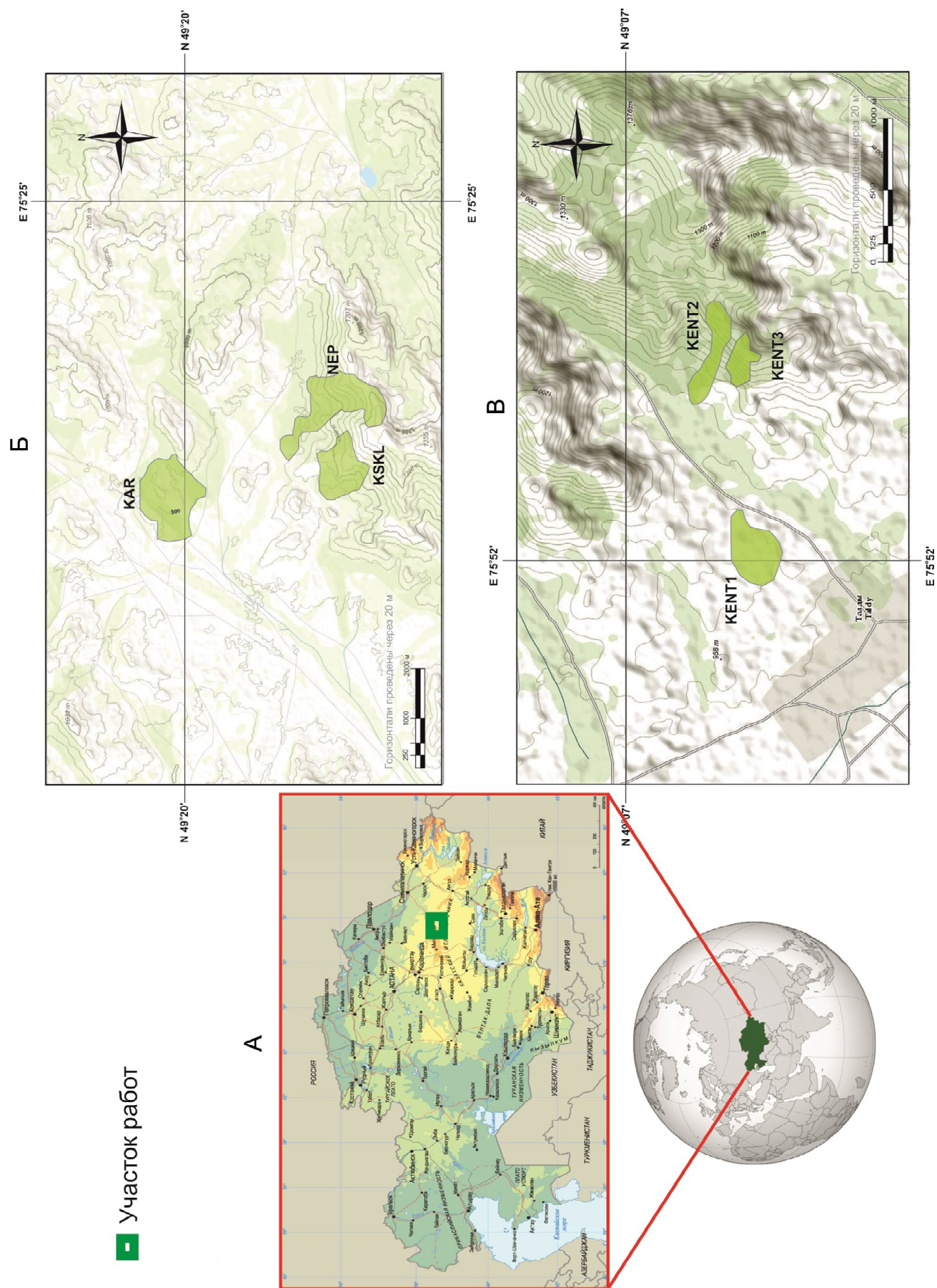


Рис. 1. Положение ключевых участков на схеме. А – общее расположение; Б – Каркаралинский ключевой участок; В – ключевой участок Кент

Fig. 1. Location of key areas on the scheme. A – general position; Б – Karkaralinskiy key-site; В – key-site Kent

вых и сухих деревьев. Для отбора образцов из живых деревьев использовался возрастной буров Прессера. С его помощью были получены радиальные керны диаметром 4–5 мм. Длина бура составляла, как правило, от 10 до 50 см и менялась в зависимости от диаметра ствола, свойств древесины и ее подверженности различным факторам внешней среды. Керна, согласно общепринятой методике, отбирались по нескольким радиусам. Бурение производилось в направлении, перпендикулярном продольной оси ствола дерева. В том случае, когда ствол был единым и имел диаметр меньший или равный длине бура, дерево пропиливалось насквозь и мы получали два противоположных радиуса.

В основе всех подходов к окончательной датировке лежит метод перекрестного датирования (cross-dating method) [Wigley et al., 1987]. Он заключается в использовании неповторимого во времени рисунка годовичных колец древесины и позволяет с высокой точностью определить календарную дату выпадающих или ложных колец. Это особенно актуально для нашей работы. Первоочередной задачей являлось получение абсолютного возраста образцов, то есть точное определение календарной даты образования всех годовичных колец. Изображения отсканированных кернов в высоком разрешении (1500 dpi) были использованы в программе CooRecorder для измерения ширины годовичных колец в полуавтоматическом режиме. Образцы с очень узкими годовичными кольцами измерялись на полуавтоматической установке LINTAB-5 с точностью 0,01 мм. Измерения и первоначальная перекрестная датировка образцов производились в программе CDendro и TSAP-Win. В качестве эталонных использовались самые узкие и самые широкие кольца, а также кольца, содержащие патологические структуры. Нарушение синхронности в изменчивости прироста между сравниваемыми образцами или смещение эталонных колец свидетельствовало о наличии выпавших или ложных колец.

После первоначальной перекрестной датировки проводилась проверка в программе COFESHA. В этой программе также контролировалось качество измерений и выполнялся поиск выпадающих и ложных колец. Для перекрестной датировки образцов в программах TSAP-Win и CDendro используется индекс перекрестной датировки (Cross-Date Index, **CDI**), являющийся интегральной характеристикой, основанной на коэффициенте корреляции Пирсона, коэффициенте синхронности, *t*-value и нескольких других статистиках [Мацковский, 2013]. Как правило, в программе COFESHA для перекрестной датировки используется разбиение серии измерений на 50-летние интервалы с наложением по 25 лет, однако в данной работе из-за небольшого возраста деревьев серии измерений разбивались на 30-летние интервалы с наложением по 15 лет. Затем осуществлялась независимая датировка этих интервалов.

В программе COFESHA выводятся все коэффициенты корреляции для последовательного сдвига интервалов от –10 до +10 лет от текущей пози-

ции. Если хотя бы для одного такого сдвига коэффициент корреляции окажется больше, чем на текущей позиции, или будет статистически незначим, программа выдает предупреждение [Мацковский, 2013].

Абсолютный прирост древесины, помимо климата, зависит от многих других факторов, например, от возрастных изменений, от конкурентных взаимоотношений в ареале произрастания, от катастрофических явлений и проч. Влияние этих неклиматических факторов было по возможности минимизировано для сопоставления изменчивости прироста древесины и выделения общего климатического сигнала. Этого можно было добиться с помощью стандартизации или индексирования. Для каждого образца подбиралась индивидуальная биологическая кривая роста, заданная детерминированной функцией, то есть такой функцией, которая каждый раз возвращает один и тот же результат, если предоставлять ей один и тот же набор входных значений и использовать одно и то же состояние базы данных [Мацковский, 2013]. Затем путем деления рассчитывались индексы значения ширины кольца из соответствующего значения аппроксимирующей кривой.

Индексированные данные обладают инерционностью или автокорреляцией, так как климат в год *t* влияет на прирост дерева и в последующие годы (*t*+1, *t*+*n*) ввиду откладывания сахаров и сохранения хвои на протяжении нескольких лет [Methods ..., 1990]. Для устранения автокорреляционной составляющей была использована модель авторегрессии, с помощью которой автокорреляция из индивидуальных серий индексов была удалена. После этого полученные ряды усреднялись. Этот процесс позволил усилить сигнал высокочастотной составляющей климатической изменчивости в хронологиях [Hughes, Swetnam, 2011].

После построения хронологии необходимо проверить ее надежность. Наиболее часто используемым критерием оценки качества хронологии является выраженный сигнал популяции (Expressed Population Signal или **EPS**) [Wigley et al., 1984]. В последние десятилетия считается, что если значение EPS, высчитанное для хронологии с помощью 30-летнего «плавающего» окна с 29-летним перекрытием, превышает 0,85, то хронология надежна. Этот порог (**EPS**>0,85) стал эталоном, определяющим выборки и периоды, пригодные для реконструкции. Такой показатель означает, что из-за уменьшения числа образцов погрешность хронологии возрастет не более чем на 15% по сравнению с генеральной совокупностью. Однако не существует очевидного способа определить величину EPS, которая бы гарантировала, что конкретная хронология подходит для реконструкции климатических условий. Основоположники метода Т.М.Л. Вигли, К.Р. Бриффа и П.Д. Джонс [Wigley et al., 1984; Methods ..., 1990] писали о том, что «сила общего сигнала не может быть интерпретирована исключительно в климатических терминах, поскольку общая дисперсия мо-

жет также возникнуть из других факторов», а значит, ни одна конкретная величина EPS не может считаться адекватной или минимальной для обеспечения надежности хронологии [Buras, 2017]. Правильнее сказать, что EPS является мерой того, насколько хорошо конкретная конечная выборка данных представляет возможную бесконечно продолжительную хронологию. Также EPS указывает на изменчивость сигнала популяции во времени [Wigley et al., 1984], что не обязательно отражает интенсивность климатического сигнала, который должен быть реконструирован. Согласно последним данным [Buras, 2017], вместо измерения показателя EPS для математически более верных построений в некоторых случаях лучше использовать параметр уровня сигнала подвыборки (Subsample Signal Strength или SSS), также описанный в работе Т.М.Л. Вигли с соавторами [Wigley et al., 1984], или проверочные тесты с перекрестной калибровкой [Buras et al., 2017].

Несмотря на перечисленные ограничения, использование параметра EPS может помочь идентифицировать периоды с низкой прогностической мощностью, так как зачастую низкие значения EPS указывают на малый размер выборки, как, например, в данной работе для периода, предшествующего 1803 году.

В разных климатических условиях начало, окончание и продолжительность вегетационного сезона различны, а фенологические наблюдения, по которым определяются эти характеристики, зачастую отсутствуют. В связи с этим нами был взят в рас-

смотрение временной период с 1 апреля по 30 октября текущего года, охватывающий сезоны вегетации на территории Сибири. В качестве климатических переменных использованы данные по среднесуточным температурам воздуха и суточным осадкам, измеренным в течение ряда лет [Koninklijk ..., <https://www.knmi.nl>].

Результаты исследований и их обсуждение. Для каждой из шести проанализированных площадок построены древесно-кольцевые хронологии KAR, NEP, KSKL, KENT1, KENT2, KENT3, которые в дальнейшем объединены в сводные для ключевых участков хронологии KARKARALINSK и KENT для Каркаралинского участка и участка Кент соответственно. Так как при анализе этих хронологий выяснена высокая степень их схожести, путем сопоставления названных выше хронологий получена одна – общая для изучаемой территории хронология MAIN (рис. 2). Ее продолжительность составила 376 лет, таким образом, она охватила временной интервал с 1639 по 2015 гг. (так как вегетационный период на момент отбора образцов еще не был завершён).

Ввиду недостаточно большого количества образцов, хронология которых покрывает временной интервал более двухсот лет, временной интервал с 1639 по 1802 гг. нельзя рассматривать как достоверный, так как погрешность хронологии на этом участке возрастает более чем на 15% по сравнению с генеральной совокупностью. По этой причине достоверно реконструировать палеоклиматические события можно только для периода с 1803 г.,

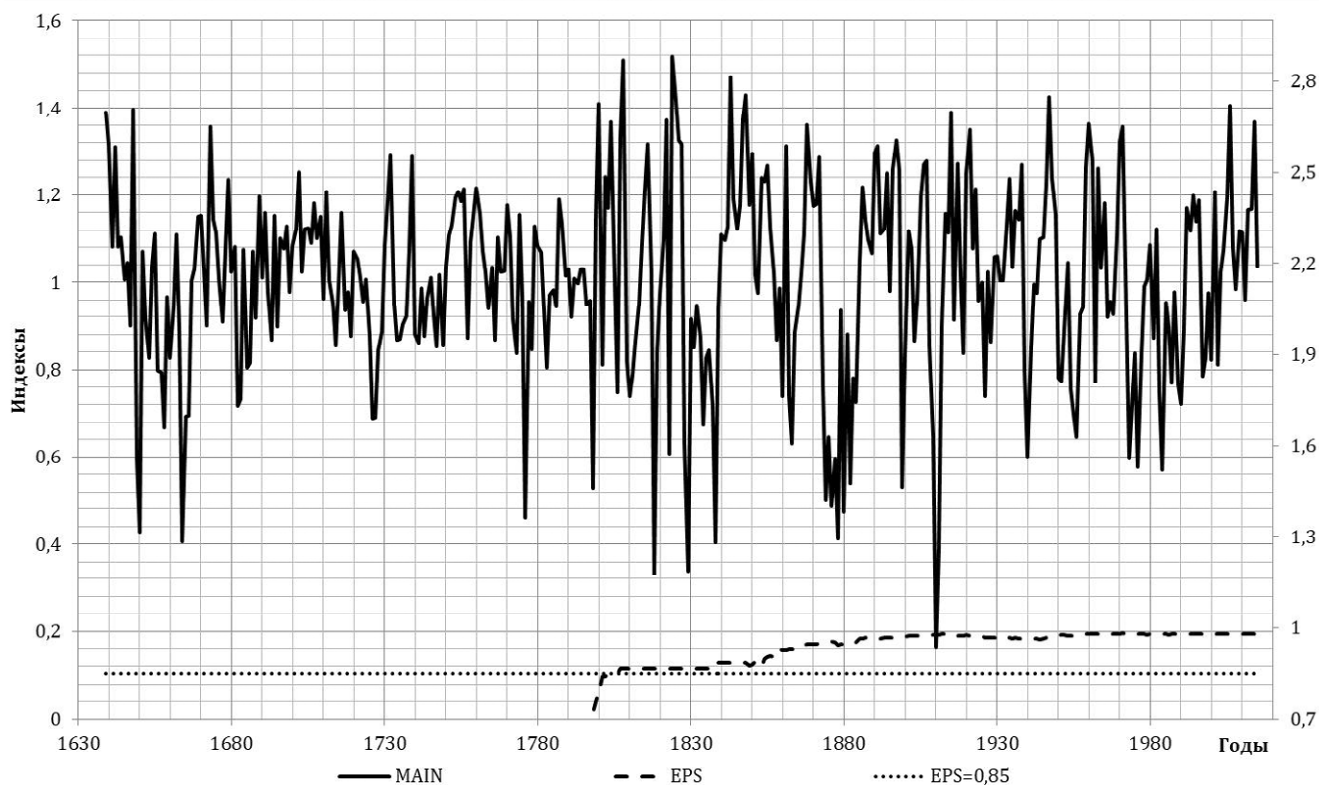


Рис. 2. Сводная хронология MAIN для ключевых участков

Fig. 2. Overall chronology MAIN for the key areas

более ранний же период можно проанализировать на предмет выявления общих тенденций изменения климата в пределах изучаемой территории. Кроме того, при возможном дальнейшем обнаружении археологических данных станет возможным продлить полученную в данной работе древесно-кольцевую хронологию.

В то время как доступные метеорологические данные [Koninklijk ..., <https://www.knmi.nl>; NOAA. National ..., www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-data/datasets/tree-ring] охватывают период лишь с 1902 г., благодаря полученной хронологии можно выявить общие тенденции изменения климата более чем на сотню лет ранее. Однако для этого необходимо удостовериться, какой климатический фактор в первую очередь влияет на прирост древесины в исследуемом регионе.

Для определения статистических связей между различными климатическими параметрами и шириной годичного кольца, то есть для оценки влияния климата на формирование ширины годичных колец, согласно общепринятой дендрохронологической методике [Hughes, Swetnam, 2011], заключающейся в расчете коэффициентов корреляции дендрохронологических данных с основными ежемесячными или ежегодными метеорологическими параметрами за год прироста и за предшествующий год, а также с учетом особенностей вегетационного периода в регионе, проведен корреляционный анализ между индексами хронологий и значениями среднемесячных температур и осадков за период с апреля предыдущего года по октябрь текущего.

Для вычисления пространственных корреляций с сеточными климатическими параметрами древесно-кольцевые показатели, заданные в точке отбора образцов с соответствующими координатами (по г. Каркаралинск), были преобразованы в поля данных, заданных в узлах сетки с шагом $0,5^\circ$ по широте и долготе. Это осуществлялось в программе DendroClim2002. Искомая хронология сопоставлялась с температурными параметрами и с данными по выпадению осадков.

Корреляционный анализ между индексами хронологий и значениями среднемесячных температур и осадков за период с апреля предыдущего года по октябрь текущего проводился для периода с 1902 по 2015 гг. Он отчетливо показал (рис. 3), что прирост сосны в исследуемом районе положительно коррелирует с количеством выпавших осадков в июле–августе ($R=0,23-0,32$; $p<0,05$). Таким образом, отражается реакция на осадки и влажность почв в указанные месяцы. Кроме того, обнаруживается отрицательный климатический отклик с температурой тех же месяцев ($R = -0,315-0,209$; $p<0,05$), что свидетельствует о том, что лимитирующим фактором на данной территории действи-

тельно является количество осадков. Такая чувствительность прироста сосны к тепло- и влагообеспеченности летнего периода косвенно указывает на засухозависимый сигнал, то есть снижение количества выпадающих осадков и рост температур приводят к формированию экстремально узких колец. Кроме того, на прирост сосны текущего года оказывают влияние климатические условия прошлого года.

Для более детального анализа климатического отклика изучалась «плавающая» корреляция хронологии с метеорологическими параметрами, которая позволяет оценить стабильность связи во времени. Климатическая функция отклика для всех параметров не стабильна во времени. Так, положительная связь хронологии с осадками августа текущего года обнаружена в 1990–2000 гг., а отрицательная – с температурой августа и июля в 2000–2015 гг. По полученному графику нельзя утверждать, что на протяжении рассматриваемого периода лимитирующий фактор менялся. Важно обратить внимание на тот факт, что график «плавающей» корреляции построен только для последних десятилетий, так как неупорядоченное чередование повышения и снижение влияния на прирост древесины температур на фоне общего ограничивающего воздействия количества выпадающих осадков характерно именно для недавнего прошлого.

Благодаря выявлению лимитирующего фактора, которым является количество осадков, а также построению древесно-кольцевой хронологии для периода с 1639 г. по настоящее время стало возможным проанализировать изменения климата, проис-

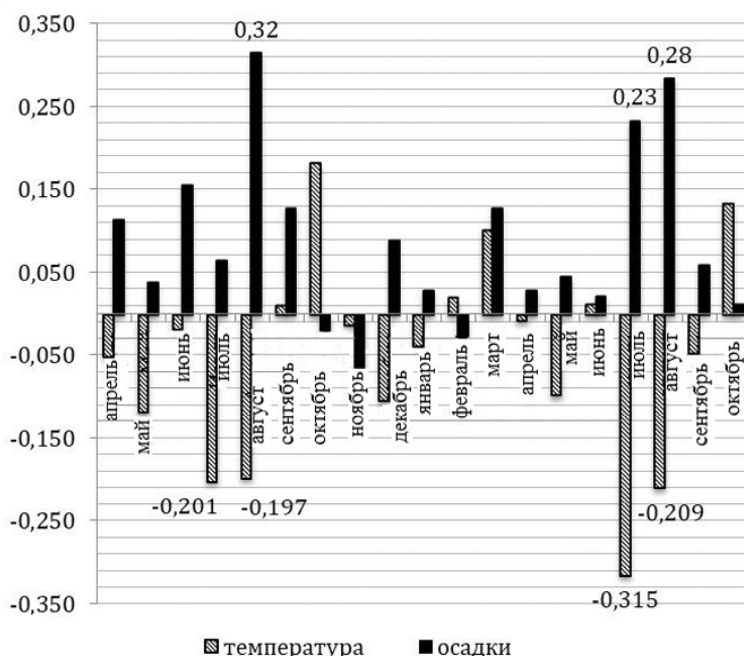


Рис. 3. График зависимости между индексами хронологий и значениями среднемесячных температур и осадков за период с апреля предыдущего года по октябрь текущего проводился для периода с 1902 по 2015 гг.

Fig. 3. The relationship between the chronological indices and the values of mean monthly temperatures and precipitation for the period from April of the previous year to the current October (from 1902 to 2015)

ходившие в исследуемом районе. Важно отметить, что проведенные исследования позволяют изучить продолжительный период, не охваченный инструментальными метеорологическими наблюдениями (то есть период до 1902 г.). Однако, несмотря на получение хронологии продолжительностью чуть более 370 лет, достоверно судить об экстремальных палеоклиматических событиях можно лишь для периода 1803–2015 гг.

По дендрохронологическим данным можно уверенно выделять такие экстремальные климатические события как засухи, так как благодаря выявлению лимитирующего фактора можно достоверно утверждать о его решающем воздействии на прирост древесины. Депрессии прироста (отрицательные пики кривой на рис. 4), вероятнее всего, следует связать с сильными засухами, сопровождавшимися повышением температур в летний период. Так, 1997, 1984, 1954, 1910, 1899, 1836 и 1798 годы можно охарактеризовать как наиболее засушливые. При этом самым засушливым за весь период, охваченный древесно-кольцевой хронологией, был 1910 год. Кроме того, отмечаются даже засушливые периоды – с 1973 по 1976, с 1875 по 1879 и с 1806 по 1808 гг. Противоположная ситуация была характерна для множества других периодов (на рис. 4 в качестве примера выделены 1824, 1947 и 2006 гг.), когда условия произрастания деревьев, вероятнее всего, были наиболее комфортными. Однако судить о реальной климатической обстановке в эти периоды затруднительно, так как достоверно установить истинные причины высокого прироста ввиду сложности взаимодействия природных факторов и одновременности воздействия климатических факторов не представляется возможным.

После проведенных исследований была предпринята попытка сопоставления полученных данных с доступными данными по соседним регионам. Среди

известных и доступных древесно-кольцевых хронологий ближайшей к изучаемому региону является единственная хронология, построенная О.Н. Соломиной для территории, расположенной к северо-западу от г. Алматы. Эта хронология размещена в международной базе NOAA [NOAA. National ..., www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-data/datasets/tree-ring] и представляет собой массив данных по ширине колец, который можно использовать для перекрестного датирования. На начальных этапах сравнения полученной в данной работе хронологии и алматинской хронологии выяснено отсутствие корреляции между ними.

Наиболее продолжительной дендрошкалой из ближайших к изученной территории районов является эталонная дендрошкала, созданная в 2000 г. П.А. Окишевым и Ю.К. Нарожным по спилам лиственницы сибирской на Алтае. Изученные деревья произрастают в поясе горной тайги у ее верхнего предела в системе хребтов Бие-Катунского водораздела, северного склона массива Биш-Иирду, верховьев долин рек Актру и Корумду [Евсеева, Жилина, 2010]. Интересно, что, по словам авторов, их данные согласуются с исследованиями на Кавказе и Полярном Урале. Несмотря на то что данная информация доступна только в графическом виде, а также на разницу в степени осредненности хронологий, обусловленную, главным образом, разницей в их «масштабах» (хронология для Алтая включает гораздо более обширные данные, над которыми ученые работали несколько лет), можно провести визуальное сравнение алтайской и полученной нами в данном исследовании хронологий (рис. 5).

С начала XIX в. между рассматриваемыми хронологиями начинают прослеживаться некоторые сходства, выраженные единовременными близкими по значению индексов прироста пиками кривых. Эти сходства нарушаются периодами, когда в Казахстане



Рис. 4. Древесно-кольцевая хронология MAIN с указанием экстремальных климатических событий (засух)

Fig. 4. Tree-ring chronology MAIN with indication of extreme climatic events (droughts)

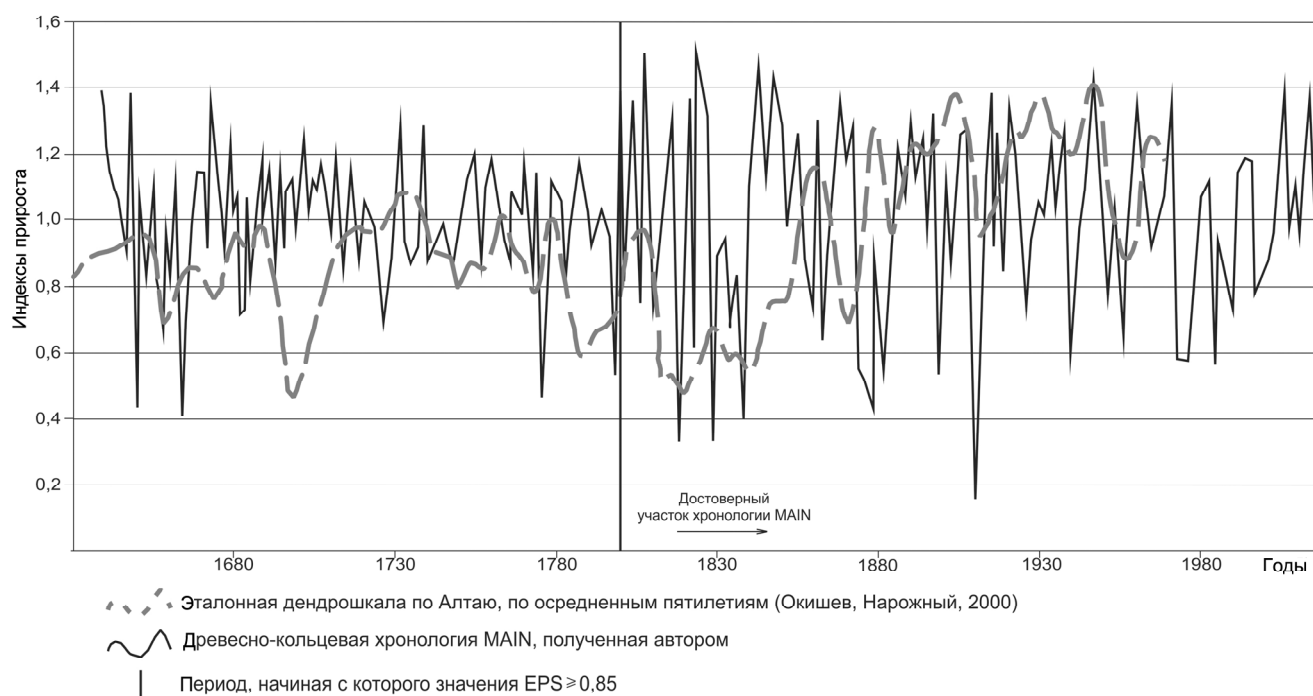


Рис. 5. Сравнение древесно-кольцевой хронологии MAIN с эталонной дендрошкалой по спилам лиственницы сибирской на Алтае, созданной П.А. Окишевым, Ю.К. Нарожным [2000]

Fig. 5. Comparison of the tree-ring chronology MAIN with the reference dendroscale based on Siberian larch tree cuts from the Altai Mountains (created by P.A. Okishev, Yu.K. Narozhnyy [2000])

наблюдался высокий прирост, а на Алтае низкий, и наоборот. Подобные расхождения между синтезированными кривыми сухости по высокогорным регионам (таким как Алтай) и низкогорным (таким как Казахский мелкосопочник) фиксировались ранее по спорово-пыльцевым данным. Полученные различия объяснялись задержкой реакции на изменение инсоляции в результате таяния мерзлоты на больших высотах, а также периодическими повышениями влажности в низкогорных регионах [Zhang, Feng, 2018].

Начиная со второй половины XIX в., эти расхождения встречаются все реже, после чего вовсе исчезают. Согласно мнению П.А. Окишева [1982], именно с этого времени начался энергичный процесс отступления ледников Алтая, лесная растительность стала продвигаться вверх по склонам, наступило потепление и увеличилась влажность. Все это позволяет предположить, что черты сходства рассматриваемых хронологий обусловлены завершением климатического воздействия такого трансконтинентального события, как Малый ледниковый период.

П.А. Окишев [Нарожный, Окишев 1998; Окишев, 1982, 1985] считает, что Малый ледниковый период на Алтае охватывал XVII–XIX вв., когда из-за падения температуры летней воздуха на $0,8^{\circ}$ – $0,9^{\circ}\text{C}$ произошло продвижение ледников. В целом, этот период характеризуется большинством исследователей как холодный и влажный [Lan et al., 2017; Putnam et al., 2016; Rao et al., 2019 и др.]. Однако при более детальном рассмотрении выясняется, что в ходе Малого ледникового периода во всей Средней Азии реконструировалось особенно малое коли-

чество осадков в зимние месяцы [Fohlmeister et al., 2017]. Оно определялось влиянием отрицательного индекса NAO (North Atlantic Oscillation), изменяющим направление зимних ветров в этом регионе [Fohlmeister et al., 2017; Yang et al., 2019; Zhang, Feng, 2018]. Таким образом, в контексте детальных реконструкций, которые позволяют осуществлять дендрохронологический метод, недостаточно охарактеризовать Малый ледниковый период как «влажный», так как в течение этого времени происходили изменения влажности, контролируемые вариациями индекса NAO. Это еще раз подтверждает, что построенная нами кривая может интерпретироваться как кривая сухости климата.

Отметим, что высказанное предположение о достижении схождения между полученной в данной работе кривой и эталонной дендрошкалой по Алтаю со второй половины XIX в. в результате завершения климатического воздействия Малого ледникового периода в настоящий момент носит лишь гипотетический характер и требует более подробного и глубокого изучения. Полученные в данной работе материалы позволят при дальнейшем сопоставлении их с результатами других палеоклиматических реконструкций провести более углубленное изучение Малого ледникового периода в рассматриваемом регионе.

Выводы.

Выполненное исследование доказывает целесообразность дендрохронологических работ для реконструкции изменений природной среды аридных районов в прошлом.

На основе результатов дендроклиматического анализа 140 образцов сосны обыкновенной, отобранных на шести опытных площадках ключевых участков Каркаралинского горного массива и массива Кент, сделаны следующие выводы:

– образцы древесины сосны обыкновенной кулундинской (*P. sylvestris* ssp. *kulundensis*) обладают хорошей чувствительностью и пригодны для проведения дендрохронологических работ, построения древесно-кольцевых хронологий и сопоставления с климатическими параметрами;

– построена древесно-кольцевая хронология по ширине годичных колец, охватывающая период с 1639 по 2015 гг. общей продолжительностью 376 лет. При этом определен абсолютный возраст каждого образца;

– выявлена связь особенностей роста деревьев в регионе исследований с климатическими фак-

торами: установлено, что на прирост древесины наиболее заметное воздействие оказывает количество осадков, выпадающее в теплый период года (количество осадков – лимитирующий фактор прироста), климатический отклик на температуры тех же месяцев отрицательный;

– для надежной части полученной древесно-кольцевой хронологии (с 1803 г.) выявлены наиболее засушливые годы: 1997, 1984, 1954, 1910, 1899, 1836, 1798; и периоды: с 1973 по 1976, с 1875 по 1879, а также с 1806 по 1808 гг.;

– сопоставление полученной древесно-кольцевой хронологии по ширине годичных колец с эталонной дендрохронологической шкалой по Алтаю [Окишев, Нарожный, 2000] обнаруживает наличие общих климатических трендов в регионах, начиная со второй половины XIX в.

Благодарности. Полевые исследования и отбор образцов проведены при финансовой поддержке РФН (проект № 17-77-10134). Дендроклиматический анализ выполнен при поддержке РФФИ (проект № 18-00-00470). Авторы выражают признательность коллективу отдела гляциологии Института географии РАН за возможность выполнения аналитической работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атлас СССР. М.: Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1983. 260 с.

Воскресенский С.С. Геоморфология СССР. М.: Высшая школа, 1968. 368 с.

Григорьев А.И., Карнаухова Т.В. Динамика радиального прироста сосны обыкновенной в условиях Казахского мелкосопочника // Омский научный вестник. 2013. № 1. С. 233–235.

Григорьев А.И., Карнаухова Т.В. Влияние засух на годичный прирост сосны обыкновенной в условиях Казахского мелкосопочника // Омский научный вестник. 2014. № 1. С. 139–141.

Евсеева Н.С., Жилина Т.Н. Палеогеография конца позднего плейстоцена и голоцена (корреляция событий). Томск: Изд-во науч.-технич. лит., 2010. 177 с.

Климанов В.А., Тарасов П.Е., Тарасова И.В. Колебания климата степной зоны Казахстана в голоцене (по данным спорово-пыльцевого анализа) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 1994. № 1. С. 25–34.

Кременецкий К.В., Тарасов П.Е., Черкинский А.Е. История островных боров Казахстана в голоцене // Ботанический журнал. 1994. Т. 79. № 3. С. 13–29.

Мацковский В.В. Климатический сигнал в ширине годичных колец хвойных деревьев на севере и в центре Европейской территории России. М.: ГЕОС, 2013. 148 с.

Мецераков Ю.А. Рельеф СССР (морфоструктура и морфоскульптура) М.: Мысль, 1972. 520 с.

Нарожный Ю.К., Окишев П.А. Динамика ледников Алтая в регрессивную фазу Малого ледникового периода // Материалы гляциологических исследований. 1998. № 87. С. 119–123.

Нигматова С.А. Палинологическая характеристика культурных слоев эпохи бронзового и раннего железного века Семиречья (Юго-Восточный Казахстан) // Методические аспекты палинологии. Материалы X Всероссийской палинологической конференции. М.: Изд-во ИГиРГИ, 2002. С. 21–23.

Нигматова С.А. Стратиграфия, палеогеография и климаты четвертичного периода аридных регионов Центральной Азии (по палинологическим данным). Автореферат диссертации на соискание доктора г.-м. наук. Алматы, 2010. 48 с.

Окишев П.А. Динамика оледенения Алтая в позднем плейстоцене и голоцене. Томск, 1982. 210 с.

Окишев П.А. «Малый ледниковый период» на Алтае // Материалы гляциологических исследований. 1985. № 52. С. 110–173.

Окишев П.А., Нарожный Ю.К. Динамика ледников и климата в горах Южной Сибири. Региональный мониторинг атмосфер. Природно-климатические изменения. Ч. 4. Томск, 2000. С. 164–199.

Сваричевская З.А. Геоморфология Казахстана и Средней Азии. Л.: Изд-во ЛГУ, 1965. 296 с.

Тарасов П.Е. Палеогеография степной зоны Северного и Центрального Казахстана в голоцене: Автореф. дисс. канд. геогр. наук. М., 1992. 16 с.

Шукин И.С. Геоморфология Средней Азии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983. 432 с.

Baigunakov D., Sabdenova G. Some Results of Studying the Ancient History of Kazakhstan // Procedia – Social and Behavioral Sciences. 2014. V. 131. P. 304–308.

Buras A. A comment on the Expressed Population Signal // Dendrochronologia. 2017. V. 44. P. 130–132.

Buras A., Zang C., Menzel A. Testing the stability of transfer functions // Dendrochronologia. 2017. V. 42. P. 56–62.

Fohlmeister J., Plessen B., Dudashvili A.S. et al. Winter precipitation changes during the Medieval Climate Anomaly and the Little Ice Age in arid Central Asia // Quaternary Science Reviews. 2017. V. 178. P. 24–36.

Haruda A. Regional pastoral practice in central and southeastern Kazakhstan in the Final Bronze Age (1300–900BCE) // Archaeological Research in Asia. 2018. V. 15. P. 146–156.

Hughes M.K., Swetnam T.W., Diaz H.F. Dendroclimatology. Progress and prospects. V. 11. Springer, 2011. 365 p.

Lan J., Xu H., Sheng E. et al. Climate changes reconstructed from a glacial lake in High Central Asia over the past two millennia // Quaternary International. 2018. V. 487. P. 43–53.

MacKlin M.G., Panyushkina I.P., Toonen W.H.J. et al. The influence of Late Pleistocene geomorphological inheritance and Holocene hydromorphic regimes on floodwater farming in the Talgar

catchment, southeast Kazakhstan, Central Asia // *Quaternary Science Reviews*. 2015. V. 129. P. 85–95.

Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences (Eds. Cook E.R. Kairiukstis L.A.). Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 1990. 394 p.

Panyushkina I.P. Impacts of cooling climate on prehistoric herding and farming strategies during the Bronze-Iron Age transition on the margins of the Eurasian steppe // *Quaternary International*. 2012. V. 279–280. P. 367.

Panyushkina I.P., Chang C., Clemens A.W., Bykov N. First tree-ring chronology from Andronovo archaeological timbers of Bronze Age in Central Asia // *Dendrochronologia*. 2010. V. 28. № 1. P. 13–21.

Putnam A.E., Putnam D.E., Andreu-Hayles L. et al. Little Ice Age wetting of interior Asian deserts and the rise of the Mongol Empire // *Quaternary Science Reviews*. 2016. V. 131. P. 33–50.

Rao Z., Huang C., Xie L. et al. Long-term summer warming trend during the Holocene in central Asia indicated by alpine peat $\delta^{13}\text{C}$ record // *Quaternary Science Reviews*. 2019. V. 203. P. 56–67.

Tarasov P., Jolly D., Kaplan J. A continuous Late Glacial and Holocene record of vegetation changes in Kazakhstan //

Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 1997. V. 136. P. 281–292.

Wigley T.M.L., Briffa K.R., Jones P.D. On the average value of correlated times series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology // *Journal of Climate and Applied Meteorology*. 1984. V. 23. P. 201–213.

Yang Y., Zhang D., Lan B. et al. Peat $\delta^{13}\text{C}_{\text{cellulose}}$ signified moisture variations over the past <2200 years in the southern Altai Mountains, northwestern China // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2019. V. 174. P. 59–67.

Zhang D., Feng Z. Holocene climate variations in the Altai Mountains and the surrounding areas: A synthesis of pollen records // *Earth-Science Reviews*. 2018. V. 185. P. 847–869.

Электронные ресурсы:

Koninklijk Nederlandse Meteorologisch Instituut [Электронный ресурс]: URL: <https://www.knmi.nl> (дата обращения 01.03.2017).

NOAA. National Centers for Environmental Information [Электронный ресурс]: URL: www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-data/datasets/tree-ring (дата обращения)

Поступила в редакцию 10.04.2018

После доработки 05.05.2019

Принята к публикации 24.05.2019

A.A. Berdnikova¹, E.A. Dolgova², R.N. Kurbanov³

DENDROCLIMATOLOGY OF *PINUS SYLVESTRIS* SSP. *KULUNDENSIS* FROM THE KAZAKH UPLANDS

The territory of Central Kazakhstan region is a white spot on the map of dendrochronological studies. For the first time about 140 samples of the Kulunda pine (*Pinus sylvestris* ssp. *kulundensis*) were analyzed on six test plots for two key areas – Karkaraly and Kent massifs. The tree is highly sensitive, which is essential for building tree-ring chronologies and comparison with climatic parameters. The resulting tree-ring width chronology covers the last 376 years (from 1639 to 2015). The absolute age of each sample is determined. The correlation of tree growth features and climatic factors has been revealed: the growth of wood is most influenced by the amount of precipitation during the warm phase of the year; the climate response to temperatures during the same months is negative. For the reliable part of the tree-ring chronology (since 1803), the most arid years, i.e. 1997, 1984, 1954, 1910, 1899, 1836, 1798, and periods, i.e. from 1973 to 1976, from 1875 to 1879 and from 1806 to 1808, are identified. The comparison of Central Kazakhstan tree-ring width chronology with a reference Altai dendrochronological scale reveals common climatic trends since the second half of the 19th century. The study proves the reasonability of using the dendrochronological method for the in-depth investigation of climate fluctuations in the arid regions.

Key words: Central Kazakhstan region, dendrochronology, dendroclimatology, Holocene

Acknowledgements. Field studies and sampling were financially supported by the Russian Science Foundation (project № 17-77-10134). Dendroclimatic analysis was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project № 18-00-00470). The authors are grateful to the staff of the Department of Glaciology, Institute of Geography RAS, for providing an opportunity for analytical investigations.

REFERENCES

Atlas SSSR [Atlas of the USSR]. M.: Glavnoye upravleniye geodezii i kartografii pri Sovete Ministrov SSSR, 1983. 260 p. (In Russian)

Baigunakov D., Sabdenova G. Some results of studying the ancient history of Kazakhstan // *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2014. V. 131. P. 304–308.

Buras A. A comment on the expressed population signal // *Dendrochronologia*. 2017. № 4. P. 130–132.

Buras A., Zang C., Menzel A. Testing the stability of transfer functions // *Dendrochronologia*. 2017. № 42. P. 56–62.

Evseeva N.S., Zhilina T.N. Paleogeografija konca pozdnego plejstocena i golocena (korreljacija sobytij) [Paleogeography of the

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography, master's student; e-mail: alinaberdnikova@yandex.ru

² Institute of Geography RAS, Department of Glaciology, Senior Research Scientist, PhD. in Geography; e-mail: dolgova@igras.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of the Pleistocene Paleogeography, Senior Research Scientist, PhD. in Geography; e-mail: roger.kurbanov@gmail.com

Late Pleistocene and the Holocene (event correlation)]. Tomsk: Izd-vo nauch.-tehnich. lit., 2010. 177. (In Russian)

Fohlmeister J., Plessen B., Dudashvili A.S. et al. Winter precipitation changes during the Medieval Climate Anomaly and the Little Ice Age in arid Central Asia // *Quaternary Science Reviews*. 2017. V. 78. P. 24–36.

Grigoriev A.I., Karnauhova T.V. Dinamika radialnogo prirosta sosny obyknovvennoj v usloviyah Kazahskogo melkosopochnika [The dynamics of the radial growth of Scots pine under the conditions of the Kazakh Upland] // *Omskij Nauchnyj Vestnik*. 2013. № . P. 233–235. (In Russian)

Grigoriev A.I., Karnauhova T.V. Vliyanie zasuh na godichnyj prirost sosny obyknovvennoj v usloviyah Kazahskogo melkosopochnika [The effect of droughts on the annual increment of Scots pine under the conditions of the Kazakh Upland] // *Omskij Nauchnyj Vestnik*. 2014. № 1. P. 139–141. (In Russian)

Haruda A. Regional pastoral practice in central and southeastern Kazakhstan in the Final Bronze Age (1300–900BCE) // *Archaeological Research in Asia*. 2018. V. 15. P. 146–156.

Hughes M.K., Swetnam T.W., Diaz H.F. Dendroclimatology. Progress and prospects. V. 11. Springer, 2011. 365 p.

Klimanov V.A., Tarasov P.E., Tarasova I.V. Kolebanija klimata stepnoj zony Kazahstana v golocene (po dannym sporovopyl'cevogo analiza) [Climate fluctuations within the steppe zone of Kazakhstan in the Holocene (according to the data of spore-pollen analysis)] // *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografija*. 1994. № 1. P. 25–34. (In Russian)

Kremeneckij K.V., Tarasov P.E., Cherkinskij A.E. Istorija ostrovnyh borov Kazahstana v golocene [The history of «island» forests of Kazakhstan in the Holocene] // *Botanicheskij Zhurnal*. 1994. T. 79. № 3. P. 13–29. (In Russian)

Lan J., Xu H., Sheng E. et al. Climate changes reconstructed from a glacial lake in High Central Asia over the past two millennia // *Quaternary International*. 2018. V. 487. P. 43–53.

Macklin M.G., Panyushkina I.P., Toonen W.H.J. et al. The influence of Late Pleistocene geomorphological inheritance and Holocene hydromorphic regimes on floodwater farming in the Talgar catchment, southeast Kazakhstan, Central Asia // *Quaternary Science Reviews*. 2015. V. 129. P. 85–95.

Mackovskij V.V. Klimaticheskij signal v shirine godichnyh kolec hvoynnyh derev'ev na severe i v centre Evropejskoj territorii Rossii [Climate signal in the width of annual rings of coniferous trees in the north and center of the European territory of Russia]. M.: GEOS, 2013. 148 p. (In Russian)

Meshherjakov Ju.A. Relief SSSR (morfostruktura i morfokul'tura) [Relief of the USSR (morphostructure and morphosculture)]. M.: Mysl, 1972. 520 p. (In Russian)

Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences (Eds. Cook E.R. Kairiukstis L.A.). Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 1990. 394 p.

Narozhnyj Ju.K., Okishev P.A. Dinamika lednikov Altaja v regressivnuju fazu Malogo lednikovogo perioda [Dynamics of Altai glaciers in the regressive phase of the Little Ice Age] // *Materialy Glaciologicheskikh Issledovanij*. 1998. № 87. P. 119–123. (In Russian)

Nigmatova S.A. Palinologicheskaja harakteristika kul'turnykh sloev jepohi bronzovogo i rannego zheleznogo veka Semirech'ja (Jugo-Vostochnyj Kazahstan) [Palynological characteristics of cultural layers of the Bronze and Early Iron Age of Semirechye (South-Eastern Kazakhstan)] // *Metodicheskie Aspekty Palinologii*. Materialy X Vserossijskoj Palinologicheskoy Konferencii. M.: Izd-vo IGIRGI, 2002. P. 21–23. (In Russian)

Nigmatova S.A. Stratigrafija, paleogeografija i klimaty chetvertichnogo perioda aridnyh regionov Central'noj Azii (po

palinologicheskim dannym) [Stratigraphy, paleogeography and climates of the Quaternary period within arid regions of Central Asia (according to palynological data)]. Avtoreferat dissertacii na soiskanie doktora g.-m. nauk. Almaty, 2010. 48 p. (In Russian)

Okishev P.A. Dinamika oledeneniya Altaja v pozdnem plejstocene i golocene [Dynamics of Altai glaciation in the Late Pleistocene and the Holocene]. Tomsk, 1982. 210 p. (In Russian)

Okishev P.A. «Malyj lednikovyj period» na Altae [«Little Ice Age» in Altai Mountains] // *Materialy Glaciologicheskikh Issledovanij*. 1985. № 52. P. 110–173. (In Russian)

Okishev P.A., Narozhnyj Ju.K. Dinamika lednikov i klimata v gorah Juzhnoj Sibiri [Dynamics of glaciers and climate in the mountains of southern Siberia] // *Regional'nyj monitoring atmosfery. Prirodno-klimaticheskie izmeneniya*. Ch. 4. Tomsk. 2000. P. 164–199. (In Russian)

Panyushkina I.P. Impacts of cooling climate on prehistoric herding and farming strategies during the Bronze-Iron Age transition on the margins of the Eurasian steppe // *Quaternary International*. 2012. V. 279–280. P. 367.

Panyushkina I.P., Chang C., Clemens A.W., Bykov N. First tree-ring chronology from Andronovo archaeological timbers of Bronze Age in Central Asia // *Dendrochronologia*. 2010. V. 28. № 1. P. 13–21.

Putnam A.E., Putnam D.E., Andreu-Hayles L. et al. Little Ice Age wetting of interior Asian deserts and the rise of the Mongol Empire // *Quaternary Science Reviews*. 2016. V. 131. P. 33–50.

Rao Z., Huang C., Xie L. et al. Long-term summer warming trend during the Holocene in central Asia indicated by alpine peat $\delta^{13}C$ cellulose record // *Quaternary Science Reviews*. 2019. V. 203. P. 56–67.

Shhukin I.S. Geomorfologija Srednej Azii [Geomorphology of Central Asia]. M.: Izd-vo Moskovskogo Universiteta, 1983. 432 p. (In Russian)

Svarichevskaja Z.A. Geomorfologija Kazahstana i Srednej Azii [Geomorphology of Kazakhstan and Central Asia]. L.: Izd-vo LGU, 1965. 296 p. (In Russian)

Tarasov P.E. Paleogeografija stepnoj zony Severnogo i Central'nogo Kazahstana v golocene [Paleogeography of the steppe zone of northern and central Kazakhstan in the Holocene]. Avtoref. diss. kand. geogr. nauk. M., 1992. 16 p. (In Russian)

Tarasov P., Jolly D., Kaplan J. A continuous Late Glacial and Holocene record of vegetation changes in Kazakhstan // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 1997. V. 136. P. 281–292.

Voskresenskij S.S. Geomorfologija SSSR [Geomorphology of the USSR]. M.: Vysshaja Shkola, 1968. 368 p. (In Russian)

Wigley T.M.L., Briffa K.R., Jones P.D. On the average value of correlated times series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology // *Journal of Climate and Applied Meteorology*. 1984. V. 23. P. 201–213.

Yang Y., Zhang D., Lan B. et al. Peat $\delta^{13}C_{cellulose}$ signified moisture variations over the past <2200 years in the southern Altai Mountains, northwestern China // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2019. V. 174. P. 59–67.

Zhang D., Feng Z. Holocene climate variations in the Altai Mountains and the surrounding areas: A synthesis of pollen records // *Earth-Science Reviews*. 2018. V. 185. P. 847–869.

Web sources:

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut [Elektronnyj resurs]: URL: <https://www.knmi.nl> (access date 01.03.2017).

NOAA. National Centers for Environmental Information [Elektronnyj resurs]: URL: www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-data/datasets/tree-ring (access date 05.03.2017).

Received 10.04.2018

Revised 05.05.2019

Accepted 24.05.2019