

УДК 551.583

ОБОБЩЕННАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ДЛЯ РОССИЙСКОГО АЛТАЯ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 2000 ЛЕТ (по озерным отложениям)

В.В. Бабич¹, А.В. Дарьин^{1,2}, Н.А. Рудая^{1,2}, Т.И. Маркович¹

¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

²Институт археологии и этнографии СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 17, Россия

На основе климатических палеореконовструкций, полученных по результатам изучения донных осадков четырех озер Горного Алтая (Телецкое, Кучерлинское, Нижнее Мультиинское и Среднее Мультиинское), впервые построена обобщенная палеохронология годовых температур для территории Российского Алтая на непрерывной временной шкале за последние два тысячелетия. Полученная интегрированная температурная реконструкция отображает все известные для данного временного интервала климатические события: теплый Романский период (~ от 200 до 500 г. н. э.), холодный период Темного века (~ от 500 до 750 г. н. э.), Средневековая теплая климатическая аномалия (~ от 750 до 1300 г. н. э.) и последующий Малый ледниковый период (~ от 1300 до 1850 г. н. э.). Сопоставление обобщенной климатической хронологии с результатами температурных палеореконовструкций по другим климатическим индикаторам для Российского Алтая, а также прилегающих к нему территорий Западной Сибири, Тывы и Западной Монголии показало полную синхронность в выделении указанных климатических событий и их временных границ. Данный факт позволяет считать, что построенная обобщенная температурная реконструкция отображает единый ход климатического развития в пределах значительной части Центрально-Азиатского региона за последние 2000 лет. Сравнительный анализ обобщенной климатической реконструкции с имеющимися количественными реконструкциями для различных регионов Северного полушария, а также с усредненной температурной хронологией для Северного полушария в целом также демонстрирует высокое сходство в проявлении и синхронности основных климатических событий, что свидетельствует о том, что климат Центральной Азии на протяжении последних двух тысячелетий менялся в полном соответствии с общим глобальным климатическим сценарием.

Палеоклимат, температура, климатическая реконструкция, озерные донные осадки, Российский Алтай, Центральная Азия

TWO MILLENNIA OF CLIMATE HISTORY FOR THE RUSSIAN ALTAI: INTEGRATED RECONSTRUCTION FROM LAKE SEDIMENT DATA

V.V. Babich, A.V. Daryin, N.A. Rudaya, T.I. Markovich

A continuous history of annual air temperatures in the Russian Altai for the past 2000 years has been reconstructed for the first time by integrating climate archives stored in the bottom sediments of four lakes in Gorny Altai (Teletskoye, Kucherla, Lower Multa, and Middle Multa). The integrated chronology comprises all known climate events of the two millennia time span: Roman warm epoch (~200 to 500 AD), Dark Age cold epoch (~500 to 750 AD), medieval warming (~750 to 1300 AD), and Little Ice Age (~1300 to 1850 AD). The events distinguished in the integrated climate reconstruction agree perfectly in number and time with the events reconstructed from other climate proxies for the Altai and adjacent areas of West Siberia, Tyva, and West Mongolia. Therefore, the temperature patterns represent a common course of the 2000-year climate evolution over a large part of Central Asia. Similar synchronicity is observed with the available quantitative climate reconstructions for the Northern Hemisphere and its different regions. It means that the climate change in Central Asia over the past two millennia has followed the general global scenario.

Paleoclimate, temperature, climate reconstruction, lake sediments, Central Asia, Russian Altai

ВВЕДЕНИЕ

Выявление климатических изменений, произошедших за последние 2000 лет, имеет важное значение для познания пространственно-временных закономерностей изменчивости климата, понимания внешней и внутренней динамики климатической системы, выявления влияния естественных и антропогенных факторов на изменение климата, прогнозирования возможного климатического сценария в бу-

© Бабич В.В., Дарьин А.В., Рудая Н.А., Маркович Т.И.

✉ e-mail: vbabich@igm.nsc.ru

душем, а также оценки взаимосвязей между климатом и историей человечества [Ammann et al., 2007; Ahmed et al., 2013; Büntgen et al., 2016; Su et al., 2016; Xu et al., 2016]. Привлекательность данного временного периода заключается в том, что, с одной стороны, его протяженность позволяет улавливать долгосрочные тренды климатических изменений глобального масштаба, с другой стороны, применяя для климатических реконструкций подходы с высоким временным разрешением, можно выявлять специфические для того или иного региона климатические события более высокого порядка. Кроме того, для данного временного интервала известны некоторые исторически подтвержденные климатические события, которые могут служить основой при оценке степени объективности создаваемых палеоклиматических реконструкций и сопоставления их с другими региональными климатическими хронологиями.

В последние годы были проведены многочисленные исследования, направленные на изучение изменения климата в разных регионах Северного полушария за последние два тысячелетия на основе различных прокси-индексов [Esper et al., 2002; Yang et al., 2002; Mangini et al., 2005; Oppo et al., 2009; Diaz et al., 2011; Graham et al., 2011; Мыглан и др., 2012; Клименко и др., 2013; Ahmed et al., 2013; Neukom et al., 2014; Бабич и др., 2015; Rudaya et al., 2016, 2020, 2021; Stauch, 2016; Lan et al., 2018; и др.], что значительно улучшило понимание климатических изменений и роли различных природных и антропогенных механизмов воздействия на климат. Тем не менее климатические сценарии в разных регионах и механизмы их развития еще до конца не исследованы и требуют дальнейшего изучения.

Систематические инструментальные наблюдения за климатом проводятся относительно недавно и охватывают достаточно короткий исторический период, редко превышающий 100—150 лет. Поэтому основным информационным источником для решения задач климатологии являются палеореконструкции, построенные с использованием различных природных явлений, имеющих определенный отклик на изменение климатических показателей — скорость прироста древесины, особенности роста кораллов и сталактитов, аккумуляция ледников, вариации состава донных осадков озер, палинологические записи и т. д. Однако не все они позволяют с высоким временным разрешением строить количественные реконструкции изменения климата за длительный временной интервал.

Для Алтайского региона имеется ряд палеоклиматических реконструкций, построенных с использованием различных методических подходов и климатических индикаторов [Волкова, 1977; Andreev et al., 2007; Rudaya et al., 2009, 2016, 2020, 2021; Мыглан и др., 2012; Agatova et al., 2012; Ненашева, 2013; Büntgen et al., 2016; Михаревич и др., 2020; Churakova et al., 2022; и др.]. Анализ этих реконструкций показывает, что большая их часть позволяет оценивать масштаб климатических изменений в номинальной или порядковой шкале, оперируя категориями «тепло — холодно», «теплее — холоднее». Другая часть палеореконструкций, построенных с использованием прокси, позволяющих генерировать количественные климатические хронологии, т. е. оценивать климатические события в абсолютных величинах, обладают рядом особенностей и ограничений. Так, реконструкции, построенные по палинологическим архивам, отличаются низким временным разрешением (несколько десятков лет), вследствие чего климатические изменения высокого порядка, характерные для изучаемого региона, не всегда выявляются, и чаще конечные результаты таких реконструкций сводятся к констатации направленности климатических изменений без их количественной оценки. Реконструкции, основанные на дендрологических данных, позволяют строить количественные температурные хронологии с высоким (годовым и выше) разрешением, но они отображают вариации летних, а не годовых температур и при этом часто охватывают сравнительно короткий временной диапазон.

Особого внимания заслуживают реконструкции, основанные на изучении химического состава донных отложений природных озерных водоемов, поскольку изучение кернов донных осадков с использованием современных методов исследования (рентгенофлуоресцентного анализа на синхротронном излучении — РФА СИ) дает возможность получать информацию с высоким разрешением и на ее основе реконструировать годовые температурные изменения на значительном временном диапазоне [Дарьин и др., 2013].

Целью данной статьи является построение обобщенной температурной палеореконструкции для Российского Алтая в интервале последних двух тысяч лет с использованием имеющихся для этой территории количественных реконструкций среднегодовых температур. Очевидно, что наиболее подходящей информационной базой для достижения поставленной цели являются климатические модели, построенные по результатам изучения донных осадков озерных бассейнов на данной территории.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для получения обобщенной температурной палеохронологии за последние два тысячелетия для Российского Алтая были использованы результаты климатических палеореконструкций по четырем озерам: Телецкое [Бабич и др., 2015], Кучерлинское [Дарьин и др., 2021], Нижнее Мультиинское и Среднее Мультиинское [данная статья], расположенным на территории Республики Алтай (рис. 1).

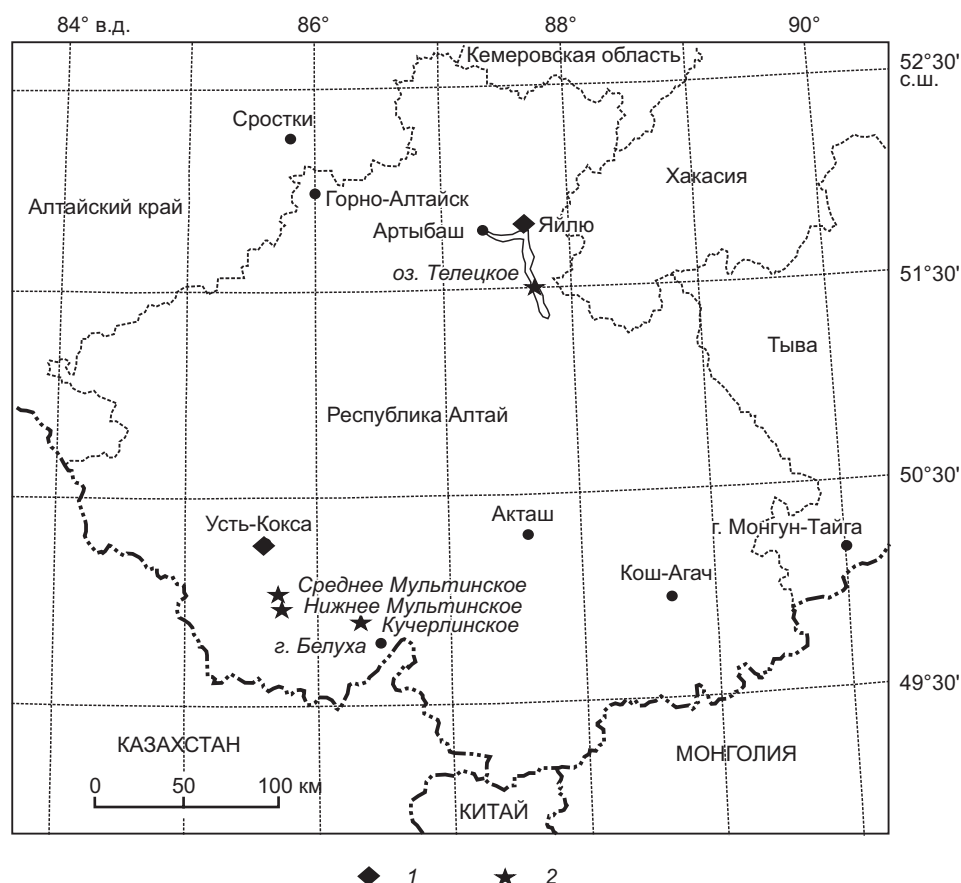


Рис. 1. Расположение метеостанций (1) и озер (2) Российского Алтая, используемых для построения обобщенной палеотемпературной реконструкции по донным отложениям.

Самое крупное в пределах данного региона Телецкое озеро расположено на северо-востоке республики на высоте 434 м над уровнем моря и окружено горными хребтами со средней высотой 1940 м. Площадь озера составляет 223 км² при длине 77.8 км, средней ширине 2.9 км и максимальной глубине 325 м. В озеро впадает около 70 небольших рек, но основным регулятором водного баланса является р. Чулышман, впадающая в южную оконечность водоема. Единственный исток — р. Бия, которая берет начало в северо-западной части озера.

Остальные три озера приурочены к северному склону Катунского хребта в юго-западной части региона.

Озеро Кучерлинское расположено на высоте 1790 м над уровнем моря, имеет длину 5 км, ширину 1 км, максимальную глубину 45 м. Озеро ледникового происхождения подпружено моренными отложениями и окружено вершинами с высотами от 2700 до 3200 м. Водный баланс формируется за счет талых вод из окружающих ледников. Озеро проточное — сквозь него протекает р. Кучерла.

В 44 км к западу от Кучерлинского озера расположены сближенные ледниково-подпрудные Мультиинские озера, разделенные перемычкой протяженностью 250 м. Среднее Мультиинское озеро расположено на высоте 1634 м, имеет длину 1990 м при ширине 750 м и средней глубине 8 м. Высота Нижнего Мультиинского составляет 1627 м над уровнем моря, длина озера 2370 м, ширина 900 м, средняя глубина 20.1 м. Оба озера приурочены к речному бассейну р. Мульта, питающейся, как и озера, талыми водами многочисленных ледников, расположенными на склонах обрамляющих хребтов с высотами до 2500 м.

Таким образом, все перечисленные водоемы представляют собой средневысокогорные пресноводные проточные озера, характерной особенностью которых является удаленность от крупных промышленных предприятий и сельскохозяйственных угодий, что обуславливает минимальный уровень антропогенного загрязнения на площади их водосборов, которое могло бы исказить климатические отклики литолого-геохимических индикаторов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Опробование и построение температурных реконструкций по всем четырем озерам производилось по единой методической схеме, подробное описание которой можно найти в соответствующих публикациях [Бабич и др., 2015; Дарьин и др., 2021].

Керновый материал для анализа отбирали ударным пробоотборником в самых глубоких точках водоемов в максимальном удалении от береговой линии — в местах с наиболее благоприятными условиями для непрерывного осадконакопления в строгой хронологической последовательности при отсутствии процессов гидроциркуляции (перемешивания). Длина кернов составляла от 1120 до 1700 мм.

Для получения информации об особенностях химического состава кернового материала использовался метод энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного анализа на синхротронном излучении (РФА СИ) в режиме непрерывного сканирования [Zolotarev et al., 2001; Дарьин и др., 2013]. Данный метод позволяет получать непрерывные многопараметрические ряды элементного состава керна с высоким временным разрешением на всю его длину с последующим переводом линейной шкалы в годичную.

Построение возрастных моделей для исследуемых кернов осуществлялось на основе оценок скорости осадконакопления по изотопным датировкам. Исследование распределения содержания ^{137}Cs выявляет четко выраженный максимум, маркирующий глобальное его выпадение после ядерных испытаний на полигоне Северная Земля в 1961—1962 гг. Изучение распределения изотопа ^{210}Pb в верхней части керна также позволяет получить временные датировки на интервале от современности до 200 л. н. [Appleby, 1997]. Определение возраста некоторых точек опробования на более глубоких интервалах керна осуществлялось методом радиоуглеродного датирования. Для полученной совокупности временных реперных точек подбиралась аппроксимирующая функция, описывающая изменение скорости осадконакопления по всему керну и позволяющая осуществить привязку аналитических данных к годичной временной шкале. Более подробное описание построения возрастной модели по указанной методике приведено в работе [Дарьин и др., 2021]. Конечный результат, полученный по описанным процедурам, иллюстрируется рис. 2 на примере кернового материала оз. Телецкое.

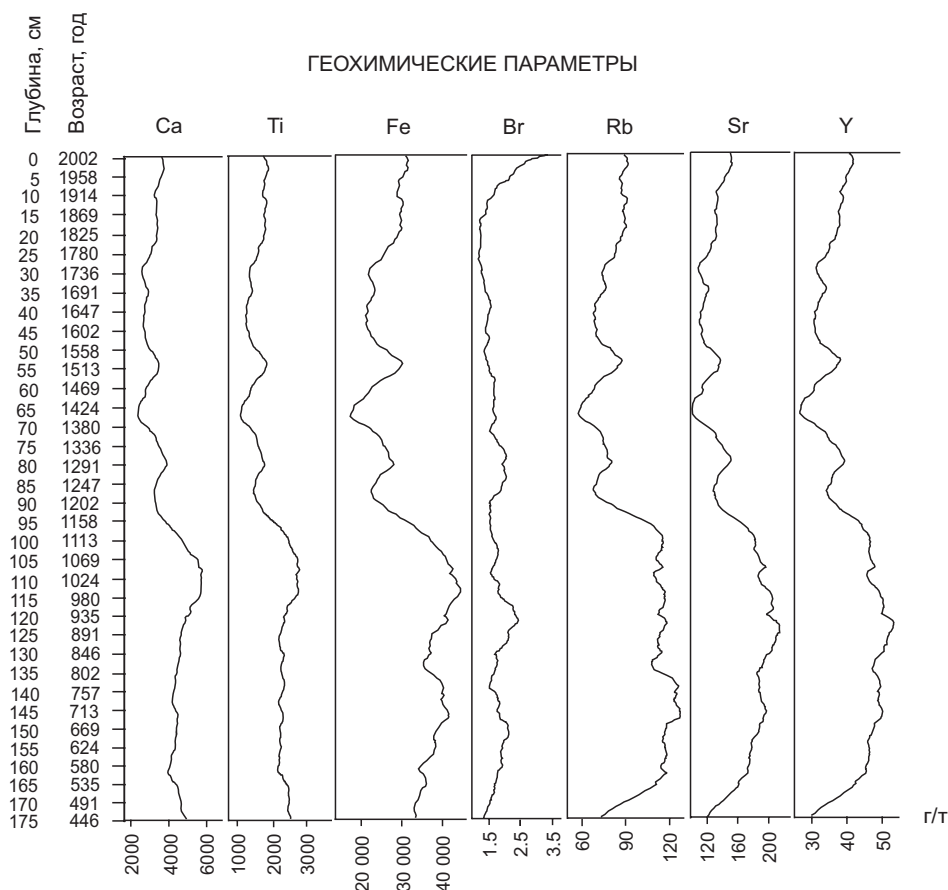


Рис. 2. Ряды химических элементов керна донных отложений оз. Телецкое, полученные методом РФА СИ с шагом опробования 0.2—1.0 мм, привязанные к временной шкале на основе изотопных датировок ^{137}Cs и ^{14}C [Бабич и др., 2015].

Далее методом многомерной линейной регрессии выявлялось наличие функциональной зависимости временной изменчивости химического состава донных отложений от температурного режима приповерхностного воздуха. Источником инструментальных метеоданных служили результаты многолетних (с 1932 г.) наблюдений на метеостанциях Усть-Кокса и Яйлю, расположенных в непосредственной близости от исследуемых объектов (см. рис. 1). В результате были получены трансферные функции (многопараметрические линейные регрессионные уравнения), позволившие с достаточно высокой точностью смоделировать среднедесятилетний температурный режим на калибровочном (инструментальном) временном интервале. Корреляция между инструментальным и модельным температурными рядами составляла от 0.83 до 0.91 при величине 95%-го доверительного интервала от ± 0.87 до ± 0.49 °C. С использованием данных трансферных функций были сконструированы количественные температурные реконструкции на всю длину кернов, послужившие основой построения интегрированной климатической хронологии для Российского Алтая за 2000-летний период.

ОБОБЩЕННАЯ 2000-ЛЕТНЯЯ КЛИМАТИЧЕСКАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ДЛЯ РОССИЙСКОГО АЛТАЯ

Обобщенная климатическая реконструкция среднедесятилетних температур на непрерывной годичной временной шкале за последние два тысячелетия для Российского Алтая была получена путем погодичного усреднения четырех исходных климатических реконструкций (рис. 3).

Визуальный анализ полученной усредненной температурной реконструкции позволяет выявить некоторые отличительные особенности в климатической истории данного региона.

Температуры первого тысячелетия нашей эры на исследуемой территории были, очевидно, выше температур последующего (за исключением последних 100 лет), а температурные максимумы ранних периодов вполне сопоставимы с температурами современного потепления. В целом климат первого тысячелетия представляет собой чередование нескольких равномасштабных относительно кратковременных потеплений и похолоданий с перепадом температуры в пределах ~ 1 °C. Температурный градиент при переходе от одного климатического события к другому составляет ~ 0.03 — 0.04 °C за 10 лет. Исключением является резкое падение температуры примерно на 0.8 °C в интервале 530—540 гг. н. э.

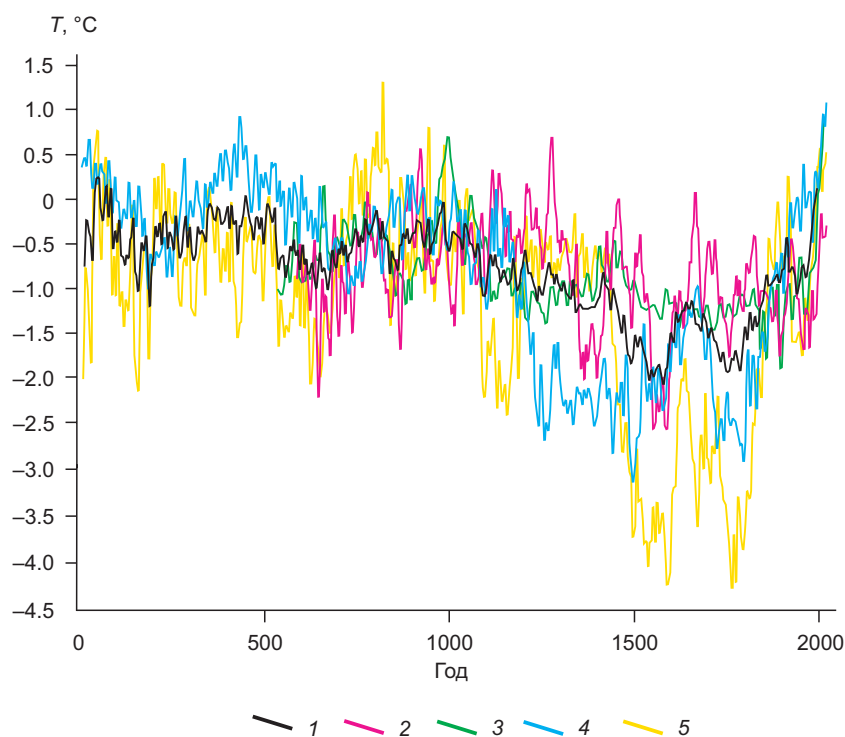


Рис. 3. Интегрированная реконструкция десятилетних температур Российского Алтая для последних 2000 лет, полученная путем усреднения климатических реконструкций по донным отложениям Телецкого, Кучерлинского и Мультиинских озер.

Температуры указаны в аномалиях относительного среднего за период 1961—1990 гг. 1 — интегрированная реконструкция; 2—5 — озера: 2 — Кучерлинское, 3 — Телецкое, 4 — Нижнее Мультиинское, 5 — Среднее Мультиинское.

Второе тысячелетие характеризуется единым достаточно длительным (около 650 лет) циклом похолодания с понижением температуры примерно на 2 °С. Однако процесс похолодания происходил неравномерно. На фоне общего понижения температуры наблюдаются два непродолжительных периода потепления, максимумы которых приходятся примерно на 1400 и 1600 гг. н. э., а самые низкие температурные экстремумы датируются ~1300, ~1500 и ~1700 гг. н. э.

ДИСКУССИЯ

Давно было замечено, что глобальный климат Северного полушария за последние 2000 лет можно разделить на несколько периодов [Lamb, 1965; Grove, 1988]. В настоящее время в истории климатического развития Северного полушария выделяются следующие события: теплый Романский период (~ от 200 до 500 г. н. э.), холодный период Темного века (~от 500 до 750 г. н. э.), Средневековая теплая климатическая аномалия (~ от 750 до 1300 гг. н. э.) и последующий Малый ледниковый период (~ от 1300 до 1850 гг. н. э.). Вопрос о их глобальном масштабе в первое время был достаточно дискуссионным [Broecker, 2001], однако в последующие десятилетия появилось много новых данных, свидетельствующих о том, что климатические события Средневековой теплой климатической аномалии и Малого ледникового периода характеризуются повсеместным проявлением во всех регионах Северного полушария [Zhu et al., 2008; Trouet et al., 2009; Graham et al., 2011; Ahmed et al., 2013; Büntgen et al., 2016; Lan et al., 2018; и др.]. Сопоставление различных палеоклиматических наблюдений, основанных на широком спектре разнообразных прокси-архивов, также позволило сделать вывод, что в первые века н. э. на большей части Северного полушария, в том числе в Тибете, Тянь-Шане, Алтае, проявились непродолжительные по времени теплый Романский и позднеантичный Малый ледниковый периоды [Zhu et al., 2008; Büntgen et al., 2016; Lan et al., 2018].

На построенной нами обобщенной температурной реконструкции весьма отчетливо отображаются все перечисленные выше климатические события в общепринятых возрастных границах (рис. 4, а).

Сопоставление обобщенной температурной реконструкции с другими хронологиями Алтая и сопредельных территорий. Для территории Алтая имеется несколько количественных температурных палеореконов, построенных по дендрологическим данным, полностью или частично укладывающихся в двухтысячный временной интервал [Мыглан и др., 2012; Yang et al., 2020; Михаревич и др., 2020], а также количественная температурная реконструкция за последние 700 лет по ледовому керну с горы Белуха [Eichler et al., 2009]. Существуют также палеоклиматические построения с более низким временным разрешением, позволяющие определить наиболее значимые климатические явления без их количественной оценки [Волкова, 1977; Agatova et al., 2012; Ненашева, 2013; Rudaya et al., 2016]. Несмотря на то, что эти реконструкции отображают либо хронологию летних температур, либо фиксируют наличие климатических событий на качественном уровне, представляет интерес использовать их для сопоставления с построенной обобщенной реконструкцией годовых температур.

На хронологии летних температур для Российского Алтая за 2000-летний период, построенной по дендрологическим данным [Büntgen et al., 2016], так же как на обобщенной реконструкции, фиксируется проявление Римского теплого периода (от ~100 до ~500 г. н. э.), который сменился резким похолоданием Темного века (от ~500 до ~850 г. н. э.); Средневекового теплого периода (от ~850 до ~1200 г. н. э.), максимум которого приходится на 982 г. н. э.; Малого ледникового периода (от ~1200 до ~1900 г. н. э.) и текущего теплого периода (с ~1900 г. н. э.) (см. рис. 4, б).

Авторы 1896-летней древесно-кольцевой хронологии для территории Республики Алтай (долины р. Джело, Северо-Чуйский хребет) [Мыглан и др., 2012] отмечают наличие ярко выраженного экстраординарного снижения летних температур после 536 г. н. э. и проявление Средневекового потепления, Малого ледникового периода и современного потепления (см. рис. 4, в).

Хорошую согласованность с интегрированной температурной хронологией демонстрирует реконструкция март-ноябрьских температур за последние 700 лет по ледовому керну с горы Белуха, расположенной в непосредственной близости от Кучерлинского и Мультиных озер [Eichler et al., 2009]. На ней отчетливо проявляется Малый ледниковый период с хорошо выраженными минимумами ~ 1500 г. н. э. и ~ 1700 г. н. э. и разделяющими их интервалами относительного потепления (см. рис. 4, г).

По результатам палинологического изучения палеопочв курганов раннесредневекового некрополя Сростки-1 (Алтайский край) с привлечением дендрологических данных [Михаревич и др., 2020] авторы также приходят к выводу, что по летним температурам наиболее экстремально холодным для региона в этот период был VI век, а температуры в период 800—1200 гг. н. э. соответствовали Средневековому потеплению (см. рис. 4, д).

Расшифровка палинологических записей в керне донных осадков Телецкого озера показала наличие короткого периода похолодания в интервале ~ 550—650 гг. н. э., сменившегося потеплением, максимум которого проявился в 1100—1150 гг. н.э. Затем наступило существенное похолодание с самыми низкими температурами в интервале 1450—1800 гг. н. э. [Rudaya et al., 2016].

Рис. 4. Сопоставление интегрированной температурной реконструкции Российского Алтая (а) с температурными хронологиями для Алтайского региона, полученными по другим климатическим индикаторам:

б — летние температуры для Российского Алтая по дендрологическим данным [Büntgen et al., 2016]; в — летние температуры для юга Российского Алтая по дендрологическим данным [Мыглан и др., 2012]; г — реконструкция март-ноябрьских температур по ледовому керну горы Белуха [Eichler et al., 2009]; д — летние температуры для Алтайского региона по дендрологическим данным [Михаревич и др., 2020]. I — современный теплый период, II — Малый ледниковый период, III — Средневековый теплый период, IV — холодный период Темного века, V — Романский теплый период.

Исследование положения границ ледников в Российском Алтае подтверждает, что в период с II по VI вв. н. э. в горах Алтая было тепло, в VI в. началось похолодание, а с XI и до начала XIII в. отмечалось потепление с последующим новым похолоданием [Волкова, 1977; Ненашева, 2013].

Радиоуглеродное датирование деревьев, погребенных под моренами, указывает на продвижение в XIII веке н.э. в горах Российского Алтая на границе с Монголией крупных ледников, ознаменовавшее начало Малого ледникового периода в этом регионе [Agatova et al., 2012].

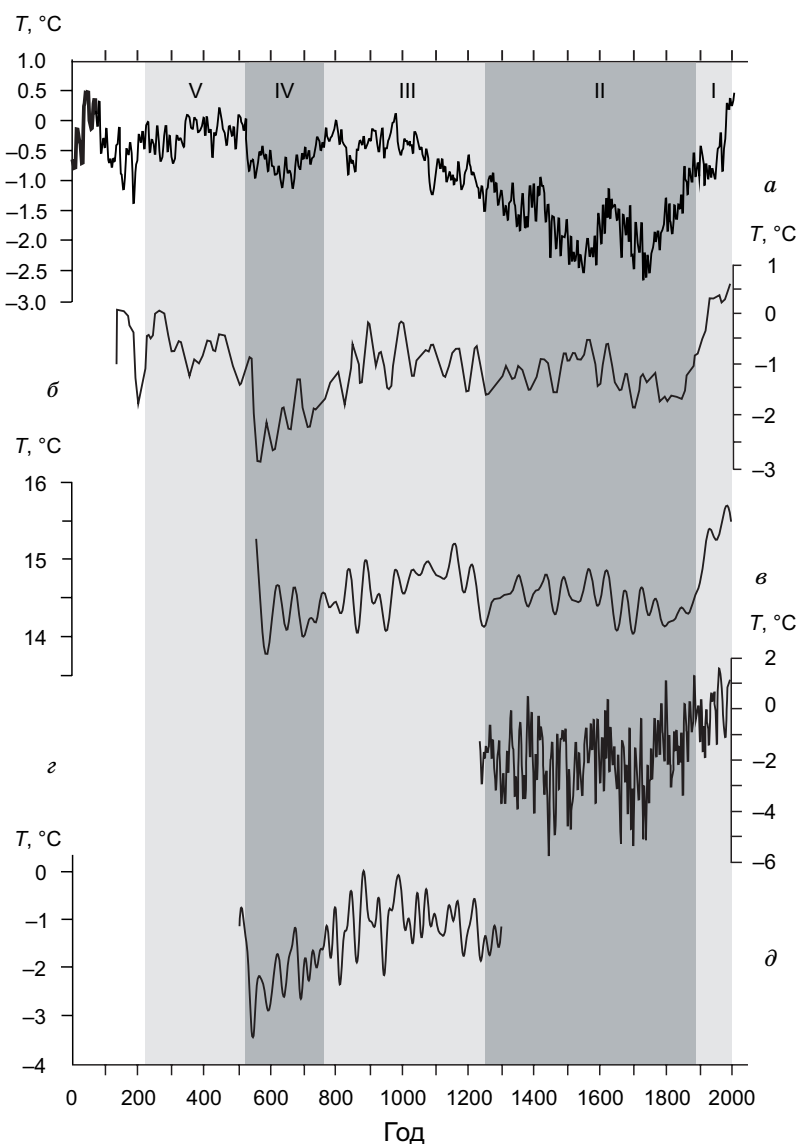
Было также проведено сопоставление обобщенной температурной реконструкции для Российского Алтая с проявлением климатических событий на сопредельных территориях.

Реконструкция летних температур за последние 2000 лет, построенная для западной части Республики Тыва на основе дендрологических исследований (горный массив Монгун-Тайга), показывает, что с учетом количества аномальных температур самыми холодными в этом регионе были 6-й, 8-й, 17-й, 18-й и 19-й века, при этом максимально холодным периодом был временной интервал 1778—1819 гг. Самыми теплыми периодами были 1-й век, 3—4-й, 7—9-й века, 15-й и 20-й века [Mygлан et al., 2012].

По палинологическим данным, в Барабинской низменности (юг Западной Сибири) в период 350—400 гг. н. э. климат с холодного сменился на теплый, близкий к современному, а в 500—550 гг. н. э. отмечалось новое похолодание. В интервале 700—1200 гг. н. э. наступило потепление с максимумом около 900—1000 гг. н. э., затем в 1220—1350 гг. н. э. последовало похолодание [Михаревич и др., 2020].

В центральной части Западной Сибири по результатам палинологических исследований периодам 600—800 и 1200—1400 гг. н. э. соответствуют холодные условия, а в интервале 900—1000 гг. н. э. наблюдалось потепление [Болиховская, Панин, 2008].

Палеоклиматическая реконструкция для Западной Монголии, построенная по керну донных отложений из оз. Баян-Нур, а также по древесным кольцам в близлежащих горах Монгольского Алтая, выявляет теплый Римский период (~100—500 г. н. э.), холодный период Темного века (~500 до ~850 г. н. э.), Средневековый теплый период (от ~850 до ~1200 г. н. э.) и Малый ледниковый период (от ~1200 до ~1900 г. н. э.) [Yang et al., 2020].



Таким образом, проведенное сопоставление с обобщенной палеоклиматической реконструкцией и другими палеоклиматическими построениями по различным прокси для территории Алтая показывает, что никаких принципиальных разногласий между ними не наблюдается. Выявляется очевидная синхронность температурных трендов на протяжении всего 2000-летнего интервала, и хорошее совпадение в выделении наиболее значимых климатических событий и их временных границ, проявленных на территории Российского Алтая за этот период.

Выявленная хорошая согласованность обобщенной температурной реконструкции для Российского Алтая с климатическими событиями на сопредельных территориях позволяет говорить о едином сценарии изменения климата за последние 2000 лет в пределах Алтайского региона и на прилегающих территориях Западной Сибири, Тувы и Западной Монголии.

Сравнительный анализ обобщенной реконструкции с региональными хронологиями Северного полушария. Представляет интерес сопоставление полученной обобщенной климатической реконструкции для Российского Алтая с аналогичными региональными количественными реконструкциями Северного полушария (рис. 5).

Реконструкция климатической истории для территории Китая (см. рис. 5, в) показывает наличие холодного периода в интервале от ~ 500 до ~ 800 г. н. э., Средневекового теплого периода от ~ 800 до ~ 1200 г. н. э., Малого ледникового периода от ~ 1200 до ~ 1900 г. н. э. и современного потепления в период с ~ 1900 г. н. э. [Yang et al., 2002, 2019].

Аналогичные климатические события с теми же возрастными рубежами выявляются для территории Северо-Восточной Европы [Клименко и др., 2013] (рис. 5, з).

Реконструкция изменения температуры для территории западной части Центральной Азии (Южный Тянь-Шань) по дендрологическим данным за последние 1300 (см. рис. 5, д) лет показывает, что, начиная с VII в. н. э., наблюдается улучшение условий роста деревьев, достигших максимума между 900 и 1000 г. н. э., когда рост деревьев был исключительно быстрым. Затем фикс-

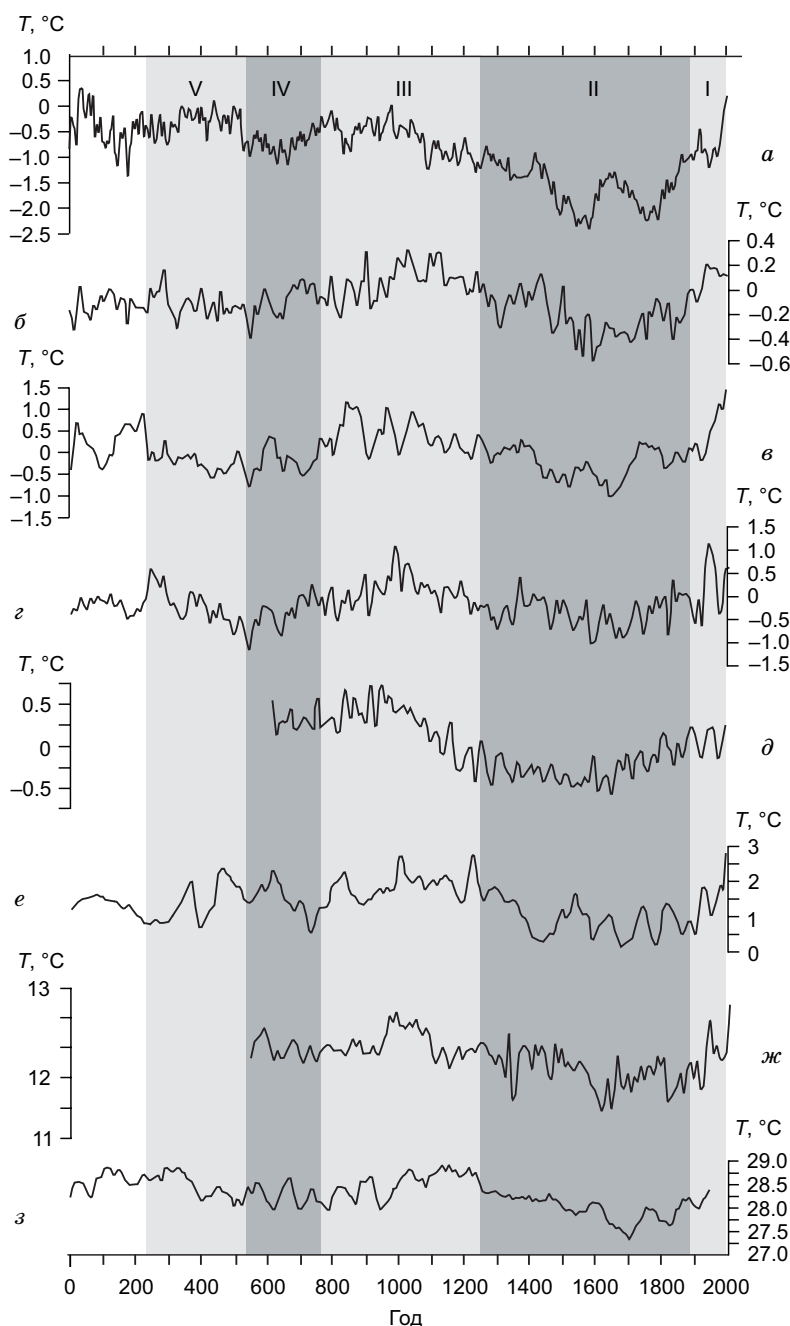


Рис. 5. Сопоставление интегрированной среднесеколетней температурной реконструкции для Российского Алтая (а) с другими температурными хронологиями:

б — обобщенная среднесеколетняя для Северного полушария [Moberg et al., 2005]; в — среднесеколетняя для территории Китая [Yang et al., 2002]; з — среднесеколетняя для северо-востока Европы [Клименко и др., 2013]; д — среднесеколетняя для Южного Тянь-Шаня [Esper et al., 2002]; е — среднесекундлетная для Центральных Альп [Mangini et al., 2005]; ж — летние температуры для западной Норвегии [Gjerde et al., 2016]; з — среднесекундлетная для западной экваториальной части Тихого океана [Orpo et al., 2009]. I — современный теплый период, II — Малый ледниковый период, III — Средневековый теплый период, IV — холодный период Темного века, V — Романский теплый период.

сируется тенденция к ухудшению условий роста, достигшая своего минимума примерно в 1500 г. н. э. и сохраняющаяся вплоть до XVII в. Ближе к XX в. индекс роста снова увеличивается. Эти долгосрочные тенденции отражают проявление в Центрально-Азиатском регионе Средневекового теплого периода, Малого ледникового периода и современного потепления [Esper et al., 2002].

Подобный климатический сценарий проявляется и в температурной реконструкции для территории Центральных Альп (см. рис. 5, *е*). Отчетливо выделяется Средневековый теплый период, длившийся примерно с 800 по 1300 г. н. э., а также Малый ледниковый период, примерно с 1400 по 1850 г. н. э., при этом самый холодный период за последние 2000 лет приходится на рубеж XVII—XVIII вв. [Mangini et al., 2005].

Наличие Средневекового теплого периода и Малого ледникового периода отчетливо выражены в температурной реконструкции для территории Западной Норвегии (см. рис. 5, *ж*). Продолжительность Малого ледникового периода определяется авторами реконструкции в интервале от 1300 до 1900 г. н. э. при максимальной степени его проявления между 1550—1750 гг. н. э. [Gjerde et al., 2016].

Реконструкция приповерхностной температуры над западной экваториальной частью Тихого океана (см. рис. 5, *з*) показывает наличие теплого периода во временном диапазоне 900—1300 гг. н. э. (Средневековое потепление) с постепенным ее снижением в интервале с 1300 по 1900 гг. с достижением минимальных значений примерно в 1700 г. н. э., что соответствует пику Малого ледникового периода [Oppo et al., 2009].

Наконец, огромное сходство фиксируется при сопоставлении Алтайской реконструкции с усредненной глобальной температурной хронологией для Северного полушария в целом (рис. 5, *б*) [Moberg et al., 2005].

Приведенное сопоставление хронологии климатических событий Российского Алтая с температурными реконструкциями для других регионов Северного полушария за последние 2000 лет выявляет высокое сходство в проявлении основных климатических событий за данный период. Наиболее отчетливо на всех реконструкциях проявились достаточно продолжительные Средневековый теплый и Малый ледниковый периоды при практически полном совпадении их возрастных границ. Более короткие климатические события Романского теплого периода и холодного периода Темного века на некоторых реконструкциях выделяются не так отчетливо, и при этом наблюдаются определенные расхождения во времени их проявления. Этот факт свидетельствует, что температурные изменения масштаба от нескольких десятилетий до столетий имеют региональную специфику и проявляются не везде и не синхронно [Oppo et al., 2009]. Временные нестыковки могут объясняться также различиями в методах построения реконструкций, разной чувствительностью климатических индикаторов к температурным изменениям и погрешностью в их временной привязке [Mangini et al., 2005; Oppo et al., 2009; Wischniewski et al., 2011; Ahmed et al., 2013; Yan, Wünnemann, 2014; Stauch, 2016; Yang et al., 2019]. Может сказываться также запаздывание реакции различных прокси на изменение климатических условий, составляющих от нескольких лет до нескольких десятилетий [Rind et al., 1999; Waple et al., 2002; Scafetta, West, 2007; Schwartz, 2007; Eichler et al., 2009; Бабич и др., 2015].

Следует отметить некоторые отличительные черты обобщенной Алтайской климатической палеорекострукции. Так, в пределах Российского Алтая, в отличие от других регионов Северного полушария, все климатические события, в том числе Романский теплый период и холодный период Темного века, проявлены весьма отчетливо. При этом на обобщенной реконструкции фиксируется резкое падение температуры в интервале 530—540 гг. н. э. Это явление, получившее название «событие 536-го года», объясняется серией сближенных по времени крупных вулканических извержений вблизи экватора, датируемых 536, 540 и 547 гг. н. э., вызвавших резкое похолодание на большей части Северного полушария и явившихся причиной непродолжительного холодного периода Темного века [Larsen, 2008; Мыглан и др., 2012; Büntgen et al., 2016; Михаревич и др., 2020]. Интересно также отметить, что на обобщенной климатической реконструкции, в отличие от других региональных хронологий, в пределах Малого ледникового периода очень четко выражены температурные минимумы, совпадающие с известными периодами гранд-минимумов в солнечной активности: минимум Вольфа (~1300 г. н. э.), минимум Шперера (~1500 г. н. э.) и минимум Маундера (~1700 г. н. э.) [Язев и др., 2011; Wanner et al., 2011; Stauch, 2016].

Отмеченные особенности, по-видимому, связаны с тем, что в условиях резко континентального климата Центральной Азии температурные изменения проявляются более отчетливо по сравнению с другими регионами Северного полушария, приближенными к океаническим и морским бассейнам, оказывающим смягчающее воздействие на климатические вариации [Büntgen et al., 2016]. В целом же можно констатировать, что хронология климатических событий для территории Центральной Азии за последние 2000 лет, отображенная в обобщенной количественной реконструкции, полностью укладывается в климатический сценарий Северного полушария.

ВЫВОДЫ

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Впервые построенная обобщенная температурная реконструкция по результатам исследования донных осадков четырех горных озер Российского Алтая для последних двух тысячелетий отчетливо отображает проявление на этой территории всех известных периодов потепления и похолодания: современный теплый период, Малый ледниковый период, Средневековый теплый период, холодный период Темного века, Романский теплый период.

Сопоставление обобщенной климатической реконструкции с данными, полученным по другим прокси-архивам, о смене климатических событий в Российском Алтае, а также и на прилегающих к нему территориях, не выявляет никаких принципиальных различий. Этот факт позволяет рассматривать обобщенную реконструкцию как отображение общего климатического тренда, проявленного не только в Российском сегменте Алтайского региона, но и в других близлежащих территориях Сибири и Центральной Азии (Алтайский край, Тыва, Западная Монголия).

Сравнительный анализ полученной обобщенной климатической реконструкции с имеющимися количественными реконструкциями для различных регионов Северного полушария, а также с усредненной температурной хронологией для Северного полушария в целом, показывает, что климат Центральной Азии на протяжении последних двух тысячелетий менялся в полном соответствии с общим глобальным климатическим сценарием.

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН (№ 122041400214-9) при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, а также при частичной поддержке грантов РНФ № 20-17-00110 и РФФИ № 19-05-50046 (РФА-СИ).

ЛИТЕРАТУРА

Бабич В.В., Рудая Н.А., Калугин И.А., Дарьин А.В. Опыт комплексного использования геохимических особенностей донных отложений и палинологических записей для палеоклиматических реконструкций (на примере оз. Телецкое, Российский Алтай) // Сибирский экологический журнал, 2015, № 4, с. 497—506, doi: 10.15372/SEJ20150401.

Болиховская Н.С., Панин А.В. Динамика растительного покрова Терехольской котловины (Юго-Восточная Тува) во второй половине голоцена // Палинология: стратиграфия и геоэкология. СПб, ВНИГРИ, 2008, т. 2, с. 69—75.

Волкова В.С. Стратиграфия и история развития растительности Западной Сибири в позднем кайнозое. М., Наука, 1977, 240 с.

Дарьин А.В., Калугин И.А., Ракшун Я.В. Сканирующий рентгеноспектральный микроанализ образцов донных осадков с использованием синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН // Изв. РАН, Серия физическая, 2013, т. 77, № 2, с. 204—206, doi: 10.7868/S0367676513020105.

Дарьин А.В., Чу Г., Сан Ц., Бабич В.В., Калугин И.А., Маркович Т.И., Новиков В.С., Максимов М.А., Дарьин Ф.А., Сороколетов Д.С., Ракшун Я.В., Гогин А.А., Сенин Р.А. Количественная реконструкция годовых температур воздуха Алтайского региона за последние 1400 лет по данным аналитической микростратиграфии ленточных глин оз. Кучерлинское // Изв. РАН, Серия географическая, 2021, т. 85, № 1, с. 97—108, doi: 10.31857/S2587556621010039.

Клименко В.В., Мацковский В.В., Дальман Д. Комплексная реконструкция температуры Российской Арктики за последние два тысячелетия // Арктика: экология и экономика, 2013, т. 4, № 12, с. 84—95.

Михаревич М.В., Мыглан В.С., Приходько В.Е. Реконструкция климата и ландшафтов средневековья на основе палинологического изучения подкурганных почв и дендрологических данных Алтая // Почвоведение, 2020, № 5, с. 519—534, doi: 10.31857/S0032180X20050093.

Мыглан В.С., Жарникова О.А., Малышева Н.В., Герасимова О.В., Ваганов Е.А., Сидорова О.В. Построение древесно-кольцевой хронологии и реконструкция летней температуры воздуха юга Алтая за последние 1500 лет // География и природные ресурсы, 2012, № 3, с. 22—30.

Ненашева Г.И. Растительность и климат голоцена межгорных котловин Центрального Алтая. Барнаул, Изд-во Алтайского ун-та, 2013, 168 с.

Язев С.А., Леви К.Г., Задонина Н.В. Комплексы активности в периоды гранд-минимумов на Солнце // Изв. Иркут. ун-та, Серия Науки о Земле, 2011, т. 4, № 2, с. 237—255.

Agatova A.R., Nazarov A.N., Nepov R.K., Rodnight H. Holocene glacier fluctuations and climate changes in the southeastern part of the Russian Altai (South Siberia) based on a radiocarbon chronology // Quat. Sci. Rev., 2012, v. 43, p. 74—93, doi: 10.1016/j.quascirev.2012.04.012.

Ahmed M., Anchukaitis K.J., Buckley B.M., Cook E.R., Smerdon J.E., Asrat A., Umer M., Borgeonkar H.P., Braida M., Stenni B., Buntgen U., Neukom R., Chase B.M., Christie D.A., Lara A., Cur-

- ran M.A.J., Moy A.D., van Ommen T., Diaz H.F., Esper J., et al.** Continental-scale temperature variability during the past two millennia // *Nat. Geosci.*, 2013, v. 6, p. 339—346, doi: 10.1038/NGEO1797.
- Ammann C.M., Joos F., Schimel D.S., Otto-Bliesner B.L., Tomas R.A.** Solar influence on climate during the past millennium: Results from transient simulations with the NCAR climate system model // *PNAS*, 2007, v. 104 (10), p. 3713—3718, doi: 10.1073/pnas.0605064103.
- Andreev A., Pierau R., Kalugin I., Daryin A., Smolyaninova L., Diekmann B.** Environmental changes in the northern Altai during the last millennium documented in Lake Teletskoye pollen record // *Quat. Res.*, 2007, v. 67, p. 394—399, doi: 10.1016/j.yqres.2006.11.004.
- Appleby P.** The use of ^{210}Pb and ^{137}Cs as tracers in modelling transport processes in lake catchment systems // *Stud. Environ. Sci.*, 1997, v. 68, p. 441—448, doi: 10.1016/S0166-1116(09)70124-4.
- Broecker W.S.** Was the warm period global? // *Science*, 2001, v. 291, p. 1497—1499.
- Büntgen U., Myglan V.S., Ljungqvist F.C., McCormick M., Cosmo N.D., Sigl M., Jungclauss J., Wagner S., Krusic P.J., Esper J., Kaplan J.O., de Vaan M.A.C., Luterbacher J., Wacker L., Tegel W., Kirdyanov A.V.** Cooling and societal change during the Late Antique Little Ice Age from 536 to around 660 AD // *Nat. Geosci.*, 2016, v. 9 (3), p. 231—236, doi: 10.1038/NGEO2652.
- Churakova (Sidorova) O.V., Myglan V.S., Fonti M.V., Naumova O.V., Kirdyanov A.V., Kalugin I.A., Babich V.V., Falster G., Vaganov E.A., Siegwolf R.T.W., Saurer M.** Modern aridity in the Altai-Sayan mountain range derived from the multiple millennial proxies // *Sci. Rep.*, 2022, v. 12 (1), 7752, doi: 10.1038/s41598-022-11299-1.
- Diaz H.F., Trigo R., Hughes M.K., Mann M.E., Xoplaki E., Barriopedro D.** Spatial and temporal characteristics of climate in medieval times revisited // *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 2011, v. 92 (11), p. 1487—1500, doi: 10.1175/BAMS-D-10-05003.1.
- Eichler A., Olivier S., Henderson K., Laube A., Beer J., Papina T., Gäggeler H.W., Schwikowski M.** Temperature response in the Altai region lags solar forcing // *Geophys. Res. Lett.*, 2009, v. 36, L01808, doi: 10.1029/2008GL035930.
- Esper J., Schweingruber F.H., Winiger M.** 1300 years of climatic history for Western Central Asia inferred from tree-rings // *The Holocene*, 2002, v. 12 (3), p. 267—277, doi: 10.1191/0959683602hl543rp.
- Gjerde M., Bakke J., Vasskog K., Nesje A., Holmes A.** Holocene glacier variability and Neoglacial hydroclimate at Ålfotbreen, western Norway // *Quat. Sci. Rev.*, 2016, v. 133, p. 28—47, doi: 10.1016/j.quasci-rev.2015.12.004.
- Graham N.E., Ammann C.M., Fleitmann D., Cobb K.M., Luterbacher J.** Support for global climate reorganization during the “Medieval Climate Anomaly” // *Clim. Dyn.*, 2011, v. 37, p. 1217—1245, doi: 10.1007/s00382-010-0914-z.
- Grove J.M.** *The Little Ice Age.* Methuen, London, Routledge, 1988, 520 p.
- Lamb H.H.** The early medieval warm epoch and its sequel // *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 1965, v. 1, p. 13—37.
- Lan J., Xu H., Sheng E., Yu K., Wu H., Zhou K., Yan D., Ye Y., Wang T.** Climate changes reconstructed from a glacial lake in High Central Asia over the past two millennia // *Quat. Int.*, 2018, v. 487, p. 43—53, doi: 10.1016/j.quaint.2017.10.035.
- Larsen L.B., Vinther B.M., Briffa K.R., Melvin T.M., Clausen H.B., Jones P.D., Siggaard-Andersen M.-L., Hammer C.U., Eronen M., Grudd H., Gunnarsson B.E., Hantemirov R.M., Naurzbaev M.M., Nicolussi K.** New ice core evidence for a volcanic cause of the A.D. 536 dust veil // *Geophys. Res. Lett.*, 2008, v. 35, L04708, doi: 10.1029/2007GL032450.
- Mangini A., Spötl C., Verdes P.** Reconstruction of temperature in the Central Alps during the past 2000 yr from a $\delta^{18}\text{O}$ stalagmite record // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2005, v. 235, p. 741—751, doi: 10.1016/j.epsl.2005.05.010.
- Moberg A., Sonechkin D.M., Holmgren K., Datsenko N.M., Karlén W.** Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data // *Nature*, 2005, v. 433 (7026), p. 613—617, doi: 10.1038/nature03265.
- Myglan V.S., Oidupaa O.Ch., Vaganov E.A.** A 2367-year tree-ring chronology for the Altai–Sayan region (Mongun-Taiga Mountain Massif) // *Archaeol. Ethnol. Anthropol. Eurasia*, 2012, v. 40 (3), p. 76—83, doi: 10.1016/j.aeae.2012.11.009.
- Neukom R., Gergis J., Karoly D.J., Wanner H., Curran M., Elbert J., González-Rouco F., Linsley B.K., Moy A.D., Mundo I., Raible Ch.C., Steig E.J., Ommen T., Vance T., Villalba R., Zinke J., Frank D.** Inter-hemispheric temperature variability over the past millennium // *Nat. Clim. Change*, 2014, v. 4, p. 362—367, doi: 10.1038/nclimate2174.
- Oppo D.W., Rosenthal Y., Linsley B.K.** 2,000-year-long temperature and hydrology reconstructions from the Indo-Pacific warm pool // *Nature*, 2009, v. 460 (7259), p. 1113—1116, doi: 10.1038/nature08233.

- Rind D., Lean J., Healy R.** Simulated time-dependent climate response to solar radiative forcing since 1600 // *J. Geophys. Res.*, 1999, v. 104, p. 1973—1990, doi: 10.1029/1998JD200020.
- Rudaya N., Tarasov P., Dorofeyuk N., Solovieva N., Kalugin I., Andreev A., Daryin A., Diekmann B., Riedel F., Tserendash N., Wagner M.** Holocene environments and climate in the Mongolian Altai reconstructed from the Hoton-Nur pollen and diatom records: a step towards better understanding climate dynamics in Central Asia // *Quat. Sci. Rev.*, 2009, v. 28, p. 540—554, doi: 10.1016/j.quascirev.2008.10.013.
- Rudaya N., Nazarova L., Novenko E., Andreev A., Kalugin I., Daryin A., Babich V., Li Hong-Chun, Shilov P.** Quantitative reconstructions of Mid- to Late Holocene climate and vegetation in the North-Eastern Altai mountains recorded in Lake Teletskoye // *Global Planet. Change*, 2016, v. 141, p. 12—24, doi: org/10.1016/j.gloplacha.2016.04.002.
- Rudaya N., Krivonogov S., Słowiński M., Cao X., Zhilich S.** Postglacial history of the Steppe Altai: Climate, fire and plant diversity // *Quat. Sci. Rev.*, 2020, v. 249, p. 106616, doi: 10.1016/j.quascirev.2020.106616.
- Rudaya N., Nazarova L., Frolova L., Palagushkina O., Soenov V., Cao X., Syrykh L., Grekov I., Otgonbayar D., Bayarkhuu B.** The link between climate change and biodiversity of lacustrine inhabitants and terrestrial plant communities of theUvs Nuur Basin (Mongolia) during the last three millennia // *The Holocene*, 2021, v. 31 (9), p. 1443—1458, doi: 10.1177/09596836211019093.
- Scafetta N., West B.J.** Phenomenological reconstructions of the solar signature in the Northern Hemisphere surface temperature records since 1600 // *J. Geophys. Res.*, 2007, v. 112, D24S03, doi: 10.1029/2007JD008437.
- Schwartz S.E.** Heat capacity, time constant, and sensitivity of Earth's climate system // *J. Geophys. Res.*, 2007, v. 112, D24S05, doi: 10.1029/2007JD008746.
- Stauch G.** Multi-decadal periods of enhanced aeolian activity on the north-eastern Tibet Plateau during the last 2ka // *Quat. Sci. Rev.*, 2016, v. 149, p. 91—101, doi: 10.1016/j.quascirev.2016.07.027.
- Su Y., Liu L., Fang X.Q., Ma Y.N.** The relationship between climate change and wars waged between nomadic and farming groups from the Western Han Dynasty to the Tang Dynasty period // *Clim. Past*, 2016, v. 12 (1), p. 137—150, doi: 10.5194/cp-12-137-2016.
- Trouet V., Esper J., Graham N.E., Baker A., Scourse J.D., David C., Frank D.C.** Persistent positive North Atlantic oscillation mode dominated the Medieval Climate Anomaly // *Science*, 2009, v. 324, p. 78—80, doi: 10.1126/science.1166349.
- Wanner H., Solomina O., Grosjean M., Ritz S.P., Jetel M.** Structure and origin of Holocene cold events // *Quat. Sci. Rev.*, 2011, v. 30 (21—22), p. 3109—3123, doi: 10.1016/j.quascirev.2011.07.010.
- Waple A.M., Mann M.E., Bradley R.S.** Long-term patterns of solar irradiance forcing in model experiments and proxy based surface temperature reconstructions // *Clim. Dyn.*, 2002, v. 18 (7), p. 563—578, doi: 10.1007/s00382-001-0199-3.
- Wischniewski J., Mischke S., Wang Y., Herzsuh U.** Reconstructing climate variability on the north-eastern Tibetan Plateau since the last Lateglacial – a multi-proxy, dual-site approach comparing terrestrial and aquatic signals // *Quat. Sci. Rev.*, 2011, v. 30, p. 82—97, doi: 10.1016/j.quascirev.2010.10.001.
- Xu H., Lan J., Sheng E., Liu B., Yu K., Ye Y., Shi Z., Cheng P., Wang X., Zhou X., Yeager K.M.** Hydroclimatic contrasts over Asian monsoon areas and linkages to tropical Pacific SSTs // *Sci. Rep.*, 2016, v. 6, 33177, doi: 10.1038/srep33177.
- Yan D., Wünnemann B.** Late Quaternary water depth changes in Hala Lake, northeastern Tibetan Plateau, derived from ostracod assemblages and sediment properties in multiple sediment records // *Quat. Sci. Rev.*, 2014, v. 95, p. 95—114, doi: 10.1016/j.quascirev.2014.04.030.
- Yang B., Braeuning A., Johnson K.R., Yafeng S.** General characteristics of temperature variation in China during the last two millennia // *Geophys. Res. Lett.*, 2002, v. 29 (9), 1324, doi: 10.1029/2001GL014485.
- Yang Y., Zhang D., Lan B., Abdusalih N., Feng Z.** Peat $\delta^{13}\text{C}_{\text{cellulose}}$ -signified moisture variations over the past ~2200 years in the southern Altai Mountains, northwestern China // *J. Asian Earth Sci.*, 2019, v. 174, p. 59—67, doi: 10.1016/j.jseaes.2018.11.019.
- Yang Y., Ran M., Sun A.** Pollen-recorded bioclimatic variations of the last ~2000 years retrieved from Bayan Nuur in the western Mongolian Plateau // *Boreas*, 2020, v. 49 (2), p. 350—362, doi: 10.1111/bor.12423.
- Zhu L., Wu Y., Wang J., Lin X., Ju J., Xie M., Li M., Mäusbacher R., Schwalb A., Daut G.** Environmental changes since 8.4 ka reflected in the lacustrine core sediments from Nam Co, central Tibetan Plateau, China // *The Holocene*, 2008, v. 18 (5), p. 831—839, doi: 10.1177/0959683608091801.
- Zolotarev K.V., Goldberg E.L., Kondratyev V.I., Kulipanov G.N., Miginsky E.G., Tsukanov V.M., Phedorin M.A., Kolmogorov Yu.P.** Scanning SR-XRF beamline for analysis of bottom sediments // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, 2001, v. 470 (1—2), p. 376—379, doi: 10.1016/S0168-9002(01)01073-7.