

Научная статья
УДК 551.1/4:551.583.13
doi: 10.17223/25421379/23/10

ЦИКЛЫ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И ДИНАМИКА БОЛОТООБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В ГОЛОЦЕНЕ



Юлия Ивановна Прейс¹, Наталья Николаевна Чередыко²

^{1,2} Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

¹ preisyui@rambler.ru

² atnik3@rambler.ru

Аннотация. Исследуется согласованность отклика болот разных зон / подзон Западной Сибири на изменения палеоклимата. С применением гармонической модели вывлено, что независимо от болота их режимы изменялись циклично с периодами около 200, 500, 800, 1 000, 1 500–1 900, 2 400 лет. Характеристики соответствующих гармоник на разных ключевых участках в большей степени согласованны, их периоды соответствуют характерным временным масштабам влияния внешних факторов, таких как солнечная активность.

Ключевые слова: торфяной разрез, палеозекотон, гидротермический режим, природ торфа, цикличность, Западная Сибирь

Источник финансирования: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российской академии наук в рамках государственного задания Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, проект № 121031300155-8.

Для цитирования: Прейс Ю.И., Чередыко Н.Н. Циклы солнечной активности и динамика болотообразовательного процесса Западной Сибири в голоцене // Геосферные исследования. 2022. № 2. С. 162–177. doi: 10.17223/25421379/23/10

Original article
doi: 10.17223/25421379/23/10

CYCLE OF SOLAR ACTIVITY AND DYNAMICS OF THE SWEET FORMATION PROCESS IN WESTERN SIBERIA IN HOLOCENE

Yulia I. Preis¹, Natalia N. Cheredko²

^{1,2} Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

¹ preisyui@rambler.ru

² atnik3@rambler.ru

Abstract. Different landscapes have different responses to climate change. Reconstructions based on information in peat can represent most of the Holocene and are informative. It is known that the leading external factor in natural objects changes is climatic, and during the Holocene there were significant long-term and short-term fluctuations in temperature and moisture conditions. Solar activity is called one of the main factors regulating the paleoclimate. The goal of this work was to study the coherence of the reaction of bog paleophytocenoses in different zones / subzones of Western Siberia to global climatic changes in paleocycles of solar activity.

We used a harmonic model. We found that, regardless of the studied peat sections, their regimes changed cyclically with periods of about 200, 500, 800, 1000, 1500–1800, 2400 years. The time scale of these cycles corresponds to the known characteristic periods of paleoclimate fluctuations. They are consistent with the scale of solar activity variability in the Holocene. The scale of the identified cycles also coincides with the cycles identified for the bogs in other regions of the Northern Hemisphere. This indicates that planetary-scale factors affect the evolution of swamps in Western Siberia in different zones / subzones. This also confirms the indicator potential of the used swamp-forming process characteristics for climatic reconstructions. To the greatest extent in Western Siberia, regardless of the zone and subzone, the swamp-forming process is characterized by fluctuations in the main global cycle of the Holocene, about 1500 years, and also in a cycle of about 1000 years.

The time course of harmonics for the processes of swamp formation in the zones of middle taiga and forest-steppe is more consistent. For the southern taiga, harmonics are in antiphase with harmonics of the same name for other zones / subzones, most often. In our opinion, this pattern is due to a more significant influence of paleocryogenic processes on the dynamics of southern

taiga bogs than bogs of middle taiga and forest-steppe. This is an investigation of the earlier transformation of middle taiga bogs to the oligotrophic stage of development. Because of this, they acquired more powerful buffering properties. In the forest-steppe bogs, there was less activity of paleocryogenic processes, because they developed in warmer climatic conditions.

The revealed patterns confirm a more sensitive response of southern taiga bogs to climate changes and their high indicator significance for paleoreconstructions. There is a consistency of fluctuations in the evolution of natural objects and system-regulating factors external to them. Regularities of regional asynchrony were also revealed. Of course, from cycle to cycle and for different peat sections, the characteristics of the harmonics may vary somewhat: period and amplitude. In addition, natural objects, including swamps, are evolving systems. They refract the response to the external factors influence, depending on the stage of their development and state significantly. If there is an assumption about the persistence of the revealed patterns, they can be used to develop and refine the reconstructions of the climate in Western Siberia and the Northern Hemisphere. This can be the basis for climate prediction.

Keywords: peat section, paleoecotope, hydrothermal regime, peat growth, cyclicity, Western Siberia

Source of financing: The Russian Academy of Sciences provided financial support to this study as part of the state assignment of the IMCES SB RAS № 121031300155-8.

For citation: Preis, Yu.I., Cheredko, N.N. (2022) Cycle of Solar activity and dynamics of the sweet formation process in Western Siberia in Holocene. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 2. pp. 162–177. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/23/10

Введение

Актуальность проблемы современного изменения климата только усиливается, а неопределенности его причин не снижаются, несмотря на колоссальный труд большого числа ученых. Отклик разных ландшафтов различен. Медленно развивающиеся последствия потепления сложно диагностируемы и предсказуемы. Региональные температурные тенденции могут быть противоположны глобальным. Все эти проблемы подтверждают высокую мировую научную значимость любого регионального палеоклиматического исследования, так как длительность инструментальных наблюдений за климатом ограничена серединой XX в. для большей части территории планеты. Для палеореконструкций привлекаются разнообразные природные архивы, ведутся активные поиски оптимальных базовых объектов, способов усовершенствования методов их датирования и новых высокочувствительных индикаторов гидротермического режима палеоклимата. Торфяные отложения являются одним из основных объектов для реконструкций и моделирования развития болотных, лесных ландшафтов и на этой основе изменений климата, баланса углерода и потоков вещества. Палеореконструкции, построенные на основе информации, содержащейся в торфах, могут охватывать большую часть голоцена и хорошо согласуются с реконструкциями, полученными с использованием других косвенных климатических индикаторов [Swindles et al., 2012].

Болотные ландшафты занимают и занимали на протяжении всего голоцена значительную часть территории Западной Сибири, крупнейшего в мире торфяного бассейна, что делает болотообразовательный процесс мощным средообразующим фактором в ре-

гионе. Здесь распространены болота разного типа и возраста, в том числе олиготрофные раннеголоценовые. Известно, что ведущим внешним фактором изменения природных объектов является климатический, а в течение голоцена происходили значительные долговременные и кратковременные колебания тепло-влажностных условий. В каждой ландшафтной зоне возможны своя специфика и сложный опосредованный отклик на климатические события разных масштабов. Понимание и количественная оценка этого отклика являются одной из основ успешности моделирования и прогноза климатических изменений, главным образом естественных, а также влияния факторов, их регулирующих. Глобальная природная ритмика, обусловленная космическими факторами, достаточно хорошо изучена, и определены ее основные количественные параметры, но знания как о проявлении ее в различных регионах, так и о ее влиянии на динамику природных объектов этих регионов недостаточны.

При исследовании отклика болотных экосистем Западной Сибири на изменения климата голоцена обозначается ряд проблем. Во-первых, неоднозначность данных имеющихся реконструкций климата по некоторым периодам голоцена и в целом по региону, и по его зонам. Это создает сложности интерпретации зависимости динамики болот от климата. Одна из причин такой неоднозначности – широкое распространение неоднократных прекращений торфонакопления как в периоды аридизации климата, так и под влиянием криогенных процессов в периоды глобальных похолоданий [Прейс, Курьина, 2012; Прейс, 2015а, 2015б, 2016]. Однако при построении реконструкций не учитываются происходящие при этом потери спорово-пыльцевых спектров, что вносит искажения. Во-вторых, для данного региона

необходима валидация широко используемых в мире индикаторов гидротермического режима болотных экотопов, значимость которых определена преимущественно для регионов с морским и умеренно-континентальным климатом. Кроме того, разные фазы развития болот могут соответствовать разной иерархии глобальных циклов климата, что также затрудняет интерпретацию. Отклик болот Западной Сибири на конкретные климатические события голоцена еще недостаточно изучен. При этом отсутствует единое мнение и о характере гидротермического режима некоторых из данных событий. Это может быть обусловлено как раз недоучетом особенностей влияния регионального континентального климата на базовый объект реконструкций – торфяные отложения.

Многие исследования показали наличие значительных колебаний климата в голоцене, часть которых имеет статус глобальных [Bond et al., 1997; Wanner et al., 2008; Swindles et al., 2012]. Большая часть периодов колебаний климата, а также эволюции природных объектов согласуется с известными гелиогеофизическими циклами. Доминирующей гипотезой изменчивости климата в масштабах от нескольких десятилетий до тысячелетнего являются изменения в поступлении солнечной энергии, хотя остается неопределенность в величине вклада этого фактора [Wanner et al., 2008]. Показано, что колебания температуры в голоцене почти совпадают или отстают до нескольких десятилетий от колебаний солнечной радиации [Xu et al., 2014], которые модулируются изменениями солнечной активности.

Основным циклом голоцена называют цикл порядка 1 500–2 000 лет. Гипотеза о циклических изменениях климата такого масштаба получила существенное развитие в работах А.В. Шнитникова в виде стройной теории о внутривековой и многовековой изменчивости климата и общей увлажненности материков Северного полушария [Шнитников, 1957]. Еще ранее цикличность такого порядка была объяснена О. Петерсоном [Pettersen, 1914] почти периодическими вариациями глобальных океанических приливных сил интервалом около 1 800 лет, вызванных резонансами в периодических движениях Земли и Луны. В зарубежной научной литературе цикл такого порядка более известен как цикл Бонда (1 470 лет), доминировавший в колебаниях климата Северной Атлантики и примыкающих к нему регионов [Bond et al., 1997], который может являться межледниковым аналогом колебаний Дансгора–Эшгера. Несмотря на критику цикла такого порядка [Wunsch, 2000], есть много работ, подтверждающих его наличие в голоцене для различных регионов Северного полушария

по различным индикаторам [Вакуленко и др., 2003; Swindles et al., 2012]. Причиной колебаний такого порядка чаще всего указываются изменения солнечной активности, хотя механизмы остаются неясными [Debret et al., 2009.; Swindles et al., 2012; Zhao, Feng, 2015].

По данным различных косвенных индикаторов изменчивости палеоклимата и солнечной активности подтверждены основные солнечные циклы голоцена с периодами около 2 500, 1 000, 800, 500, 200 лет [Xu et al., 2002; Langdon et al., 2003; Wiles et al., 2004; Nederbragt, Thurow, 2005; Vonmoos et al., 2006; Debret et al., 2009; Swindles et al., 2012; Soon et al., 2014; Поморцев и др., 2015; Usoskin et al., 2016]. Довольно информативный обзор этих работ приведен в [Swindles et al., 2012]. Циклы таких периодов выявлены и для Западной Сибири [Левина, Орлова, 1993; Букреева и др., 1995; Волкова и др., 2002; Бляхарчук, Бляхарчук, 2015], но сравнение по различным подзонам ранее не проводилось. Отмечается хорошее согласование периодов похолоданий в Западной Сибири [Антипина и др., 2019] и наступлений ледников в горах Южной Сибири [Агатова и др., 2012] около 4 900–4 200, 2 700 и 2 300 л.н. с минимумами солнечной активности, а потепления и отступления ледников около 4 000–3 600, 2 500 л.н. – с максимумами.

На фоне многовековых изменений климата развиваются вековые и внутривековые колебания. И если мы обратим внимание на современное потепление, то широко декларируемая и признанная тенденция потепления идет неравномерно – выражен внутривековой колебательный процесс. В некоторых работах с применением моделей климата и с учетом палеоинформации показано, что современная фаза потепления должна закончиться в ближайшие десятилетия, снижая антропогенное влияние на климат [Xu et al., 2014]. Будущее климатических моделей, по-видимому, в том, чтобы учитывать цикличность изменения основных параметров климата в связи с основными его регуляторами. Учет параметров цикличности, выявленной в исследованных биосферных взаимодействиях, позволит говорить о согласованных колебаниях природных объектов и внешних для них системорегулирующих факторов либо о региональной асинхронности, выявленной при сравнении специфики отклика болотных экотопов из разных природных зон.

Концепция цикличности климатических изменений развивается более века, но пока отсутствует единое мнение о механизмах влияния естественных климаторегулирующих факторов на состояние и составляющие климатической системы. Ведутся научные споры о приоритетности влияния на современное

потепление естественных или антропогенных факторов климата, и большей частью ученых признается ведущая роль последних [IPCC, 2013]. Распространены представления о недостаточности вынуждающей силы колебаний естественных факторов, таких как солнечная активность, для реализации ее климатотрегулирующей функции. Однако, известны механизмы [Carslaw et al., 2002; Pudovkin, 2004; Svensmark et al., 2016], посредством которых относительно небольшое изменение внешнего воздействия усиливается внутренними процессами, что может запускать климатические процессы большой мощности. Распространено мнение, что влияние солнечной активности на природные климатообусловленные процессы происходит через изменчивость ключевых глобальных циркуляционных режимов в северных Атлантическом и Тихом океанах [Schweinsberg et al., 2017; Bailey et al., 2018]. Кроме того, следует учитывать, что данные об изменениях солнечной активности в голоцене, кроме последних двухсот с лишним лет, косвенные, реконструированные, и нет циклов, развивающихся на нулевом уровне; любой цикл развивается на фоне более долгопериодных и является фоном для циклов меньшего масштаба, что, помимо прочего, существенно зашумляет отклик различных объектов.

Цель данной работы – исследование согласованности отклика болот различных зон / подзон Западной Сибири на глобальные климатические изменения в палеоциклах солнечной активности.

Материалы и методы исследования

Территория исследования расположена в центре крупнейшего континента, на стыке влияния циркуляционных процессов, с одной стороны, перемещаемых глобальным западным переносом, причем система Уральских гор не задерживает эти потоки, а с другой – развивающихся над Восточной Сибирью с ее резко континентальным климатом. Кроме того, для Западной Сибири характерен и меридиональный воздухообмен из-за открытости Арктическому бассейну и адвекции тропического воздуха с выходами

южных циклонов. В летний период межширотные различия в радиационном балансе существенно сглаживаются из-за большого притока солнечного тепла, а количество выпадающих осадков увеличивается за счет конвективных, вследствие перегрева подстилающей поверхности. С ростом широты, как известно, в континентальных регионах резко увеличиваются сезонные различия тепловлагообеспеченности. Указанные особенности могут существенно преломлять отклик на глобальные климатические колебания.

В качестве объектов исследования выбрано четыре ключевых торфяных разреза (ТР) из разных природно-климатических зон и подзон Западной Сибири (табл. 1, рис. 1): лесотундры, средней тайги, южной тайги, лесостепи. На всех ТР ранее были выполнены детальные (с шагом 1,5–5 см) геоботанические и торфоведческие (ботанический состав, степень разложения, зольность, плотность и аналитическая влажность) исследования по методикам Инсторфа [Лиштван, Король, 1975; Тюремнов и др., 1977], в Центре коллективного пользования Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (ЦКП ИМКЭС СО РАН, Томск) определен изотопный состав углерода ($\delta^{13}\text{C}$). Датировались придонные слои торфа и установленные по свойствам торфа палеостратиграфические рубежи. Для выявления периодов прекращения торфонакопления датированы пары соседних образцов. Всего получено 32 ^{14}C -даты в радиоуглеродных лабораториях Института геологии и минералогии СО РАН (Новосибирск) и в ЦКП ИМКЭС СО РАН. Одиннадцать AMS-дат и подготовка проб выполнены в ЦКП «Геохронология кайнозоя» Института археологии и этнографии СО РАН (Новосибирск), а датирование – на уникальной научной установке ускорительной масс-спектрометрии УМС ИЯФ (Новосибирск). Все даты были прокалиброваны при помощи программного обеспечения CALIB 7.0.4 Manual [Stuiver, Reimer, 2005; Stuiver et al., 2007] в системе BP (Before Present) от 1950 г.

Для наглядности важнейшие характеристики объектов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики объектов исследования

Table 1

Characteristics of research objects

Название ключевого участка	Географические координаты	Природная зона / подзона	Возраст, кал. л.н.	Мощность торфяной залежи, м
Хасырей	69°08'57" N, 70°15'58" E	лесотундра	1 294	0,80
Средне-Васюганское	59°26'70" N, 78°33'33" E	средняя тайга	7 145	2,62
Болтное	57°04'44" N; 79°34'29" E	южная тайга	8 194	7,35
Шерстобитово	54°58'00" N; 81°00'00" E	лесостепь	5 254	2,50

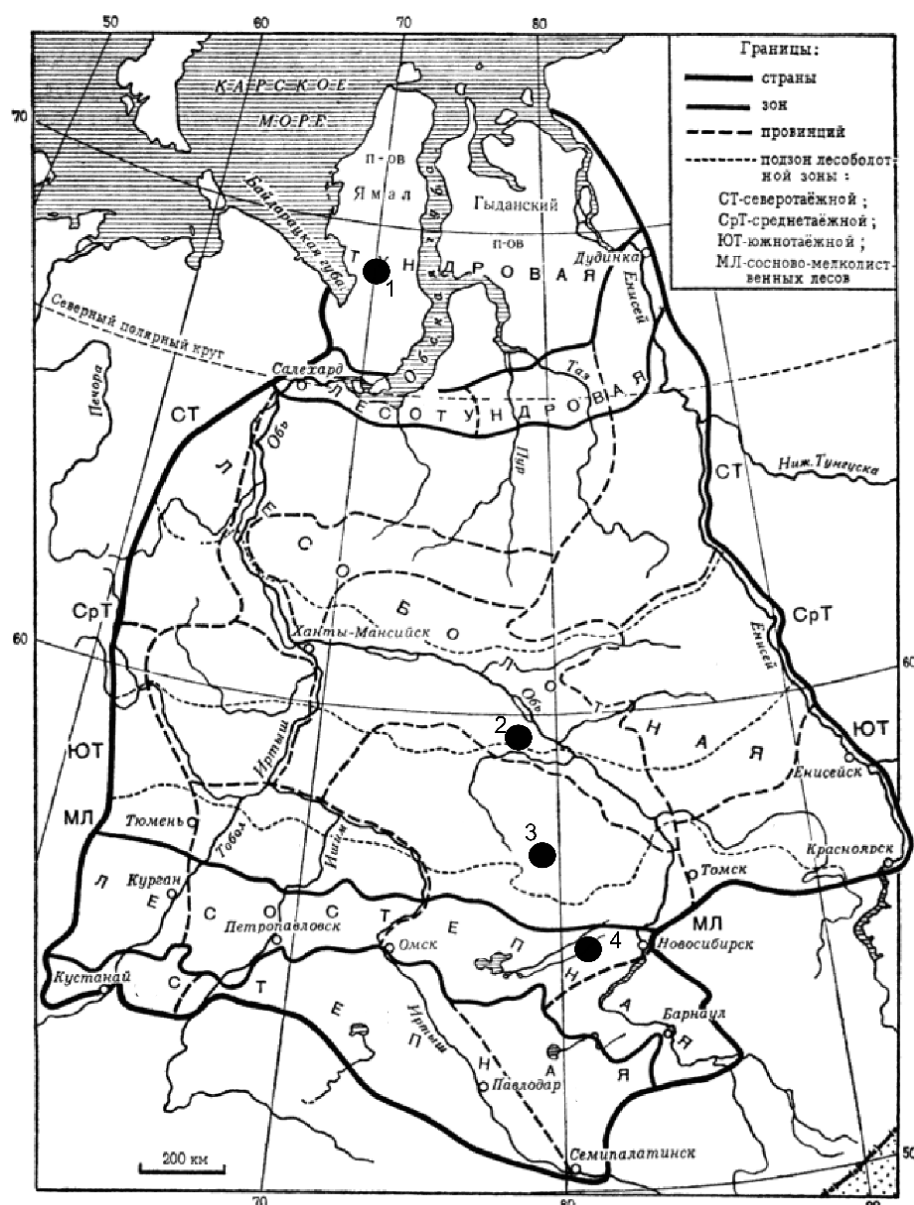


Рис. 1. Размещение объектов исследования по ландшафтным зонам / подзонам Западной Сибири

Карта-схема взята из [Гвоздецкий, Михайлов, 1978]. Цифрами обозначены ключевые участки: 1 – Хасырей, 2 – Средне-Васюганское, 3 – Болтное, 4 – Шерстобитово

Fig. 1. Location of research objects in landscape zones / subzones of Western Siberia

The schematic map is taken from [Gvozdetsky, Mikhailov, 1978]. Key areas are designated by numbers: 1 – Khasyrey, 2 – Sredne-Vasyuganskoe, 3 – Boltmoe, 4 – Sherstobitovo

На основании полученных данных выявлены особенности стратиграфии и развития этих разрезов, проведены расчеты скорости вертикального прироста ($V_{пр.}$, мм/год) и аккумуляции торфа. Для количественной оценки изменения гидрологического режима палеозкотопов был использован метод расчета индекса влажности (IW) по ботаническому составу торфа [Елина, Юрковская, 1992], согласно которому каждому растению-торфообразователю или их экологической группе приданы количественные значе-

ния в баллах (от 1 до 10). IW каждого слоя торфа рассчитывался от общей суммы баллов как отношение суммы произведений количества остатков каждого растения (в %) и его балла к суммарному количеству остатков всех растений (100 %). Некоторым растениям субарктики, отсутствующим в [Елина, Юрковская, 1992], были присвоены значения баллов с учетом принадлежности их к определенным экологическим группам по отношению к условиям увлажнения [Лапшина, 2002; Королук и др., 2005]:

субгидрофитам *Carex rotundata* и *Eriophorum scheichzeri* присвоен балл 6, гидромезофитам *Carex rariflora* и *Sphagnum lenense* – 4, мезофитам *Polytrichum juniperinum* – 2, *Dicranum angustum* и *Oncophorus wahlenbergii* – 2,5. Для *Sphagnum squarrosum*, являющегося в криолитозоне типичным доминантом сплавин термокарстовых озер, балл *IW* изменен на 8. Проведена реконструкция палеокриогенных процессов по авторской методике, основанной на поиске нарушений аутогенного развития болот, приуроченных к периодам глобальных похолоданий, и известных ботанических и физико-химических индикаторов многолетнемерзлых торфяных залежей и болот криолитозоны [Прейс, 2015б]. Показатель $\delta^{13}\text{C}$ использован как индикатор гидротермического режима болотных палеоэкотопов.

ТР Хасырей расположен на полуострове Ямал, в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород, на границе типичных и южных тундр, в районе оз. Сохонто. Поверхность Хасырея разделена плоскими канавами на выпуклые полигоны, покрытые ерниково-кустарничково-травяно-моховой растительностью. Торфяная залежь сложена переходной топяной залежью из многочисленных тонких прослоек разного ботанического состава и свойств. На фоне слабо разложившихся, нормальнозольных торфов нижней части разреза, из гипновых и травяно-гипновых торфов, и верхней, из мочажинных сфагновых, в середине разреза представлен слой более разложившихся, высокозольных и плотных травяно- и кустарничково-моховых торфов со *Sphagnum lenense*, *Polytrichum juniperinum*, *Dicranum angustum*, сформировавшихся при промерзании и пучении залежи (рис. 2). По глубине залежи показатели *IW* варьируют от 3,0 до 7,85 баллов, $\delta^{13}\text{C}$ – от –28,7 до –23,9 ‰, *Vпр.* – от 0,15 до 1,92 мм/год. Торф с глубины 0,7 м мерзлый, подстиляется песчаными суглинками [Preis et al., 2016].

Болото Средне-Васюганское расположено в подзоне средней тайги в 2 км на север от п. Средний Васюган, на I левобережной надпойменной песчаной террасе р. Васюган. ТР заложен в типичном низком ряме – сосново-кустарничково-сфагновом (*Sphagnum fuscum*) сообществе. Торфяная залежь комплексная верховая из слоев мочажинного, комплексного, ангустифолиум-, фускум-торфа, в нижней части – из пушицевых торфов (см. рис. 2). В целом от дна к поверхности разреза выражена общая тенденция закономерного уменьшения показателей свойств торфа. По глубине залежи показатели *IW* варьируют от 2,2 до 8,9 баллов, $\delta^{13}\text{C}$ – от –28,7 до –22,3 ‰, *Vпр.* – от 0,08 до 4,22 мм/год. На ранней стадии развития накопление торфа имело пульсирующий характер [Прейс, 2015а].

Болото Болтное расположено в подзоне южной тайги, в самом центре Обь-Иртышского водораздела, в верховье р. Большой Казанки, в центральной части Большого Васюганского болота. ТР заложен на окраине одного из локальных вершинных плато, в низком регрессивном ряме – сосново-кустарничково-мохово-лишайниковом сообществе со *Sphagnum fuscum*, видами рода *Cladonia* и более обводненными западинами со *Sphagnum balticum*. Торфяная залежь имеет глубину 765 см, верховая комплексная. Возраст разреза на глубине 735 см – 8 194 кал. л.н. Для залежи характерны частые резкие смены торфов разного ботанического состава. До глубины 720 см она сложена верховыми в основном сфагновыми торфами: фускум-, ангустифолиум-, балтикум-, майус-, магелланикум-, мочажинным, а также пушицево-, шейхцериево-сфагновым и многочисленными прослойками, обогащенными древесиной. Ниже, до глубины 735 см, залегают низинные осоковый и древесно-травяной торфы (см. рис. 2). Верховые торфы разреза являются преимущественно слабо разложившимися, с низкими показателями зольности и плотности, высокими – естественной влажности. Показатели водного режима *IW*, $\delta^{13}\text{C}$ и *Vпр.* значительно варьируют: от 1,6 до 8,6 баллов, от –28,0 до –20,9 ‰ и от 0,08 до 4,09 мм/год соответственно, что отражает изменения их в процессе развития болота. Датированием зафиксирован один перерыв торфонакопления.

Шерстобитовский рям находится в Барабинской лесостепи у с. Шерстобитово Чулымского района Новосибирской области. ТР Шерстобитово заложен на склоне выпуклого верховика в мезоолиготрофном березово-сосново-кустарничково-сфагновом фитоценозе со сплошным напочвенным покровом из сфагновых мхов (*Sphagnum russowii* и *S. magellanicum*). Торфяная залежь смешанная многослойная лесотопяная. Нижний слой залежи образован низинными торфами, сначала – терес-, древесно-тростниковым, а затем травяными разного ботанического состава с прослойками древесно-травяного. Выше залегают 70-сантиметровый слой верхового магелланикум-торфа с прослойкой верхового соснового. Торфы преимущественно слабо разложившиеся, нормальнозольные, с относительно невысокими показателями плотности [Мальцев и др., 2018]. По глубине залежи показатели *IW* варьируют от 2,0 до 7,3 баллов, *Vпр.* – от 0,22 до 0,88 мм/год.

Резкая граница между слоями верховых и низинных торфов, наличие прослоек с древесными остатками, многочисленные экстремумы показателей свойств торфа свидетельствуют о неоднократных обсыханиях поверхности всех этих болот и чутком отклике их на климатические изменения голоцена.

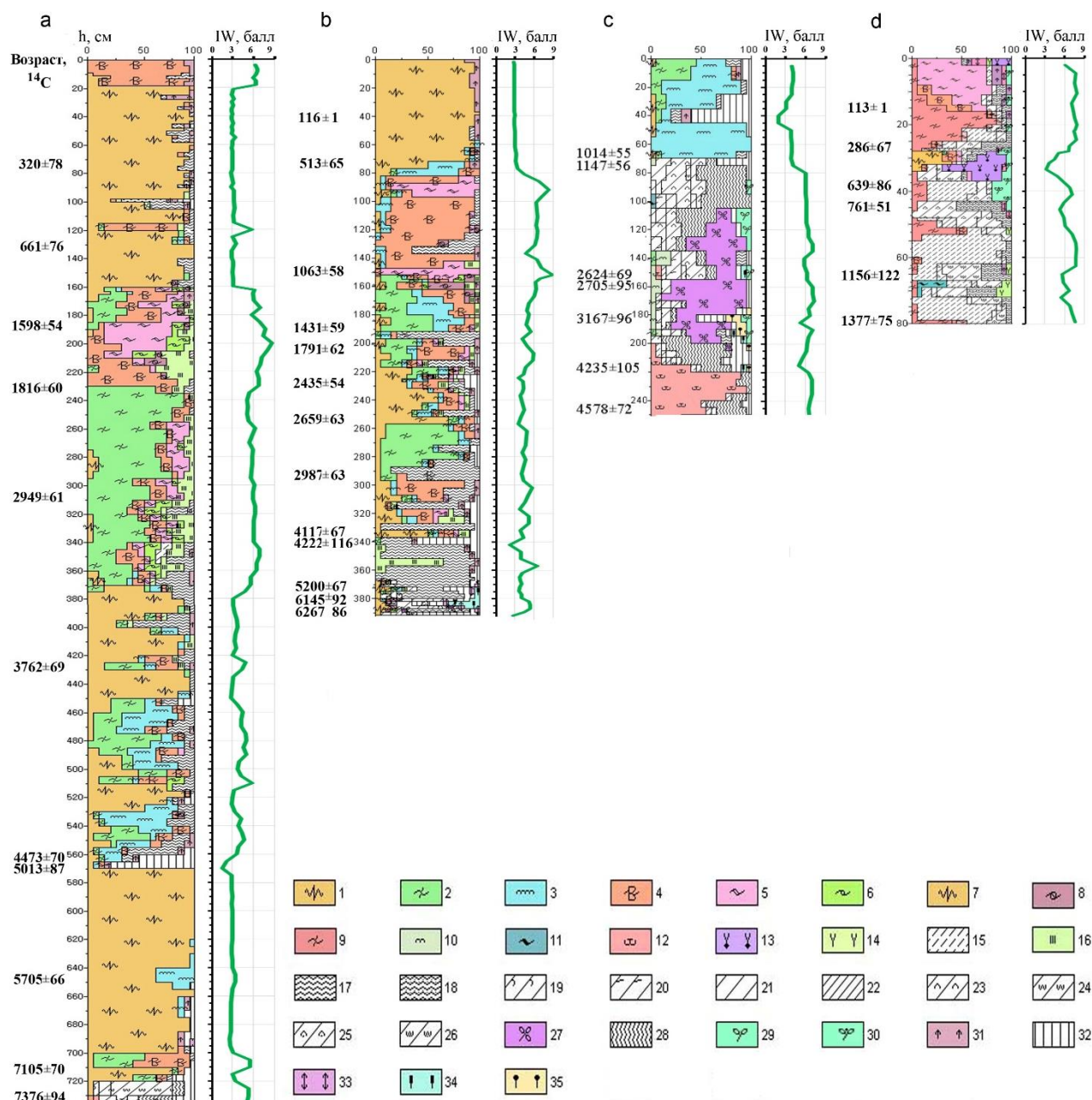


Рис. 2. Ботанический состав торфа и индексы влажности (IW) торфяных залежей исследованных болот
а – Болтное, б – Средне-Васюганское, с – Шерстобитово, d – Хасырей

Растительные остатки в торфе: 1 – *Sphagnum fuscum*; 2 – *S. angustifolium*; 3 – *S. magellanicum*; 4 – *S. balticum*; 5 – *S. majus*; 6 – *S. jensenii*; 7 – *S. lenense*; 8 – *S. fallax*; 9 – *S. squarrosum*; 10 – *S. centrale*; 11 – *S. platyphyllum*; 12 – *S. teres*; 13 – *Polytrichum juniperinum*, *Dicranum angustum*; 14 – *Aulacomnium palustre*, *Meesia triquetra*, *Oncophorus walenbergii*; 15 – *Warnstorfia fluitans*, *Calliergon sp.*, *Drepanocladus sp.*; 16 – *Scheuchzeria palustris*; 17 – *Eriophorum vaginatum*; 18 – *Eriophorum scheichzeri*; 19 – *Carex limosa*; 20 – *C. vesicaria*; 21 – *C. rostrata*; 22 – *C. appropinquata*; 23 – *C. cespitosa*; 24 – *C. juncella*; 25 – *C. rotundata*; 26 – *C. rariflora*; 27 – *Menyanthes trifoliata*; 28 – *Phragmites australis*; 29 – травянистые растения; 30 – *Rubus chamaemorus*; 31 – *Ericaceae*; 32 – древесные растения; 33 – *Betula nana*; 34 – *Typha sp.*; 35 – *Scirpus sp.*

Fig. 2. Composition of macrofossil plant remains and moisture index (IW) of peat deposits of research mires
а – Boltnoe, б – Sredne-Vasyuganskoe, с – Sherstobitovo, d – Khasyrey

Plant remains in peat: 1 – *Sphagnum fuscum*; 2 – *S. angustifolium*; 3 – *S. magellanicum*; 4 – *S. balticum*; 5 – *S. majus*; 6 – *S. jensenii*; 7 – *S. lenense*; 8 – *S. fallax*; 9 – *S. squarrosum*; 10 – *S. centrale*; 11 – *S. platyphyllum*; 12 – *S. teres*; 13 – *Polytrichum juniperinum*, *Dicranum angustum*; 14 – *Aulacomnium palustre*, *Meesia triquetra*, *Oncophorus walenbergii*; 15 – *Warnstorfia fluitans*, *Calliergon sp.*, *Drepanocladus sp.*; 16 – *Scheuchzeria palustris*; 17 – *Eriophorum vaginatum*; 18 – *Eriophorum scheichzeri*; 19 – *Carex limosa*; 20 – *C. vesicaria*; 21 – *C. rostrata*; 22 – *C. appropinquata*; 23 – *C. cespitosa*; 24 – *C. juncella*; 25 – *C. rotundata*; 26 – *C. rariflora*; 27 – *Menyanthes trifoliata*; 28 – *Phragmites australis*; 29 – herbaceous plant; 30 – *Rubus chamaemorus*; 31 – *Ericaceae*; 32 – woody plant; 33 – *Betula nana*; 34 – *Typha sp.*; 35 – *Scirpus sp.*

Для выявления цикличности климата по косвенным показателям чаще всего используется спектральный анализ [Swindles et al., 2012]. Результаты применения классического метода быстрого преобразования Фурье сильно зависят от длины ряда. Мы использовали метод, свободный от таких ограничений и описанный нами в предыдущей работе [Крутиков и др., 2010]. В выбранном подходе гармоники «подбираются» в ходе итерационного процесса на основе метода наименьших квадратов. При этом метод позволяет выявлять гармоники с периодом более половины временного ряда и – реже – немногим более длины ряда. Длина имеющегося ряда данных не отменяет существования процессов большего временного масштаба. Следует отметить, что гармоники продолжительностью более половины временного ряда нельзя с уверенностью считать полигармоническими, поскольку невозможно отследить их повторения. Поэтому применять их для прогноза следует осторожно, имея какую-либо физическую или биологическую гипотезу. В качестве аппроксимационных их применение, с нашей точки зрения, оправдано. Гармоники являются коррелируемыми, и их нельзя складывать, поэтому необходимо их удаление из исходного ряда при последующей итерации. В настоящем исследовании учитывались первые десять самых значимых гармоник. Значимость определялась по величине их амплитуды, а также по коэффициенту корреляции между исходным рядом и суммой учтенных гармоник. Представление процесса в виде суммы гармоник и остатка (непериодической функции) отражает суть природных процессов, которые не являются строго периодическими, и их особенности являются результатом воздействия нескольких факторов.

Результаты и обсуждение

Современное состояние болот разных зон / подзон Западной Сибири – это результат этапа их развития в голоцене. Стратиграфия торфяных кернов объектов исследования (см. рис. 2) характеризуется выраженными регулярными периодами смены их функционального состояния, что в большой степени может быть обусловлено откликом болот на изменения климатических условий.

Полученные результаты по выявлению скрытых периодичностей в характеристиках болотообразовательного процесса в голоцене Западной Сибири отражают чуткую реакцию болот региона на глобальную климатическую изменчивость, несмотря на их расположение в разных природных зонах / подзонах территории исследования. Каждой характеристике болотообразования соответствует характерный набор

ведущих гармоник. Тем не менее на всех рассмотренных ключевых участках в той или иной характеристике выявлены периодичности около 200, 500, 800, 1 000, 1 500–1 900, 2 500 лет (табл. 2). Исключение составляет ТР Хасырей для циклов более 1 500 лет ввиду ограниченной временной продолжительности рядов данных для него. Также цикл со средним периодом 200 лет не обнаружен в динамике ни одной из характеристик болотообразования на ТР Средний Васюган (средняя тайга) и Шерстобитово (лесостепь). Возможно, этот цикл для данных разрезов не попал в перечень десяти наиболее значимых гармоник.

Размерности циклов болотообразования соотносятся с известными характерными крупномасштабными циклами изменения природной среды в голоцене, которые регулируются внешними по отношению к геосистеме Земли факторами, такими как солнечная активность. В табл. 2 приведены средние значения периодичностей, для разных ТР они различаются на порядок в несколько десятилетий. Это обусловлено тем, что болота как природные объекты эволюционируют, и одно и то же влияние крупномасштабных факторов климата может приходиться на разные этапы развития того или иного ключевого участка.

Скорость торфонакопления в Западной Сибири независимо от зоны и подзоны изменяется в основном глобальном цикле голоцена, с периодом около 1 500 лет (см. табл. 2). Также наиболее характерным масштабом колебаний торфообразования является 1 000-летний. Обе эти периодичности выявлены для всех рассмотренных характеристик торфообразования практически на всех ТР. Остальные характерные циклы проявлены не для каждого ключевого участка и не для каждого показателя.

Порядок выявленных циклов совпадает с таковыми для болот других регионов Северного полушария [Xu et al., 2002; Langdon et al., 2003; Borgmark, 2005; Swindles et al., 2012; Turner et al., 2016]. Это свидетельствует как о влиянии на развитие болот Западной Сибири факторов планетарного масштаба, так и об индикаторном потенциале использованных характеристик болотообразовательного процесса для климатических реконструкций.

Первые, наиболее значимые, гармоники – долгопериодные, периодом более 1 000 лет, они вносят наибольший вклад в изменчивость рассмотренных показателей (рис. 3).

При сравнении периодов полученных гармоник и их временного хода на разных объектах получены как их согласованность, так и некоторые временные сдвиги (рис. 4); для разных подзон сходные гармоники могут идти и в противофазе. Локальный отклик может преломляться в зависимости от зональных особенностей расположения болота и его стадии

развития, а также в результате зашумления крупномасштабных колебаний климата короткопериодными флуктуациями климатического режима, что отражается во временном сдвиге начала и завершения циклов, различиями в значениях периода соответствующих гармоник до нескольких десятилетий.

Для процессов зон средней тайги и лесостепи отмечается большая согласованность временного хода гармоник (рис. 4, а), чем той и другой с колебаниями в южной тайге (рис. 4, б). По нашему мнению, такая закономерность обусловлена более значительным влиянием палеокриогенных процессов в глобальные похолодания голоцена на динамику южнотаежных болот, чем болот средней тайги и лесостепи, в связи с более ранним переходом среднетаежных болот на олиготрофную стадию развития и приобретением ими более мощных буферных свойств, а лесостепных – в связи с менее активными палеокриогенными

процессами в более теплых климатических условиях. Это подтверждает повышенную чувствительность южнотаежных болот к существенным климатическим изменениям и их высокую индикаторную значимость для палеореконструкций. Кроме того, на болото Болтное (южная тайга) существенное влияние оказывали локальные условия, формируя опосредованное влияние климата в связи с нахождением болота на соподчиненном элементе мезорельефа болотной системы. Водный режим этого болота определялся не только тепловлажностными условиями климата, но и влиянием поступления в аридные периоды талых вод деградирующей многолетней мерзлоты, активно формировавшейся на более высоких соседних элементах мезорельефа. Это нарушило согласованность изменения влажностного режима болотного экотопа с изменениями климатических условий.

Таблица 2

Характерные циклы в динамике болотообразовательного процесса в разных зонах / подзонах Западной Сибири в голоцене

Table 2

Characteristic cycles in the mire formation dynamics in different zones / subzones of Western Siberia in the Holocene

Характеристика	Зона / Подзона	Лесотундра	Средняя тайга	Южная тайга	Лесостепь
	Средний период цикла	Хасырей	Средне-Васюганское	Болтное	Шерстобитово
V _{пр}	2 500		V	V	V
	1 900				
	1 500	V	V	V	V
	1 000	V	V	V	V
	800		V	V	V
	500	V		V	V
	200	V		V	
IW	2 500		V		V
	1 900		V	V	V
	1 500		V	V	
	1 000	V	V	V	V
	800	V	V	V	
	500	V	V	V	V
	200	V			
δ ¹³ C	2 500		V		–
	1 900			V	–
	1 500		V	V	–
	1 000		V	V	–
	800		V	V	–
	500			V	–
	200	V			–

Примечание. Знаком «V» обозначено наличие периодичности такого порядка в соответствующем показателе в данной природной зоне / подзоне, знак «–» означает, что по данному показателю цикличность не рассчитывалась, V_{пр} – скорость вертикального прироста (мм/год), IW – индекс влажности (ступени), δ¹³C – отношения содержания стабильных изотопов углерода. Интервалы продолжительности циклов: 2 500 [2 060 ÷ 2 890], 1 900 [1 820 ÷ 2 100*], 1 500 [1 330 ÷ 1 670], 1 000 [960 ÷ 1 190], 800 [800 ÷ 890], 500 [460 ÷ 590], 200 [195 ÷ 200]. * На ТР Средне-Васюганское выявлены циклы 2 780 и 2 100, поэтому первый отнесен к квази 2 500-летнему, второй – к квази 1 900-летнему

Note. The sign “V” indicates the presence of a periodicity of this order in the corresponding indicator in a given natural zone / subzone, the sign “–” means that the cyclicity was not calculated for this indicator, V_{пр} is the rate of vertical growth (mm/year), IW is the humidity index (steps), δ¹³C are the ratios of the content of stable carbon isotopes. Cycle time intervals: 2500 [2060 ÷ 2890], 1900 [1820 ÷ 2100*], 1500 [1330 ÷ 1670], 1000 [960 ÷ 1190], 800 [800 ÷ 890], 500 [460 ÷ 590], 200 [195 ÷ 200]. * Cycles 2780 and 2100 were identified in the Sredne-Vasyuganskoe TR, so the first one is attributed to the quasi 2500-year cycle, the second – to the quasi 1900-year cycle

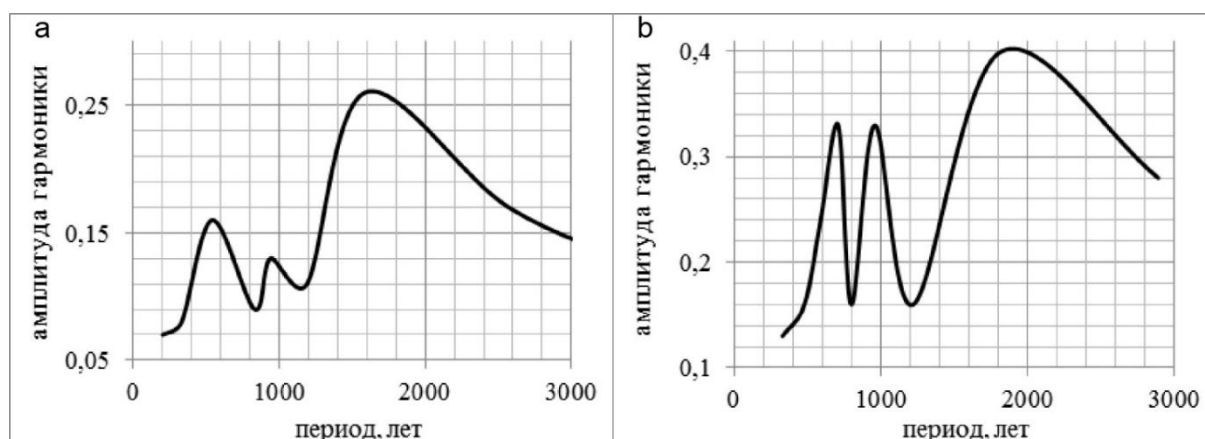


Рис. 3. Зависимость амплитуды значимых гармоник от их периода
а – для скорости вертикального прироста торфа ТР Болтное; б – для индекса влажности ТР Шерстобитово

Fig. 3. Dependence of the amplitude of significant harmonics on their period
а – for the rate of vertical peat growth of Boltnoe peat core (PC); б – for moisture index of Sherstobitovo PC

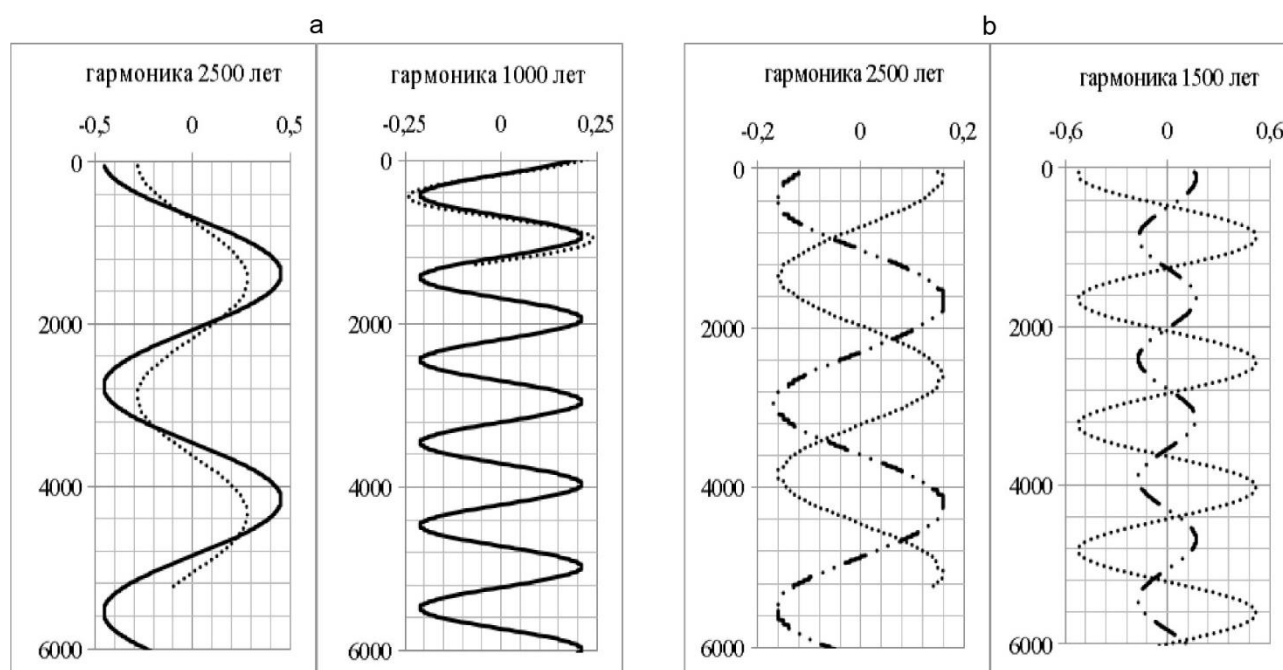


Рис. 4. Временной ход сходных по периоду гармоник в изменении различных характеристик болотообразования в разных зонах / подзонах Западной Сибири в голоцене

а – гармоники с периодом около 2 500 лет в изменениях индекса влажности на ТР Средне-Васюганское (средняя тайга, сплошная линия) и ТР Шерстобитово (лесостепь, пунктир) и гармоники с периодом около 1 000 лет в изменениях скорости вертикального прироста торфа на ТР Средне-Васюганское (средняя тайга, сплошная линия) и ТР Хасырей (лесотундра, пунктир); б – гармоники с периодом около 2 500 лет в изменениях скорости вертикального прироста торфа на ТР Болтное (южная тайга, сложный пунктир) и ТР Шерстобитово (лесостепь, пунктир) и гармоники с периодом около 1 500 лет в изменениях $\delta^{13}\text{C}$ на ТР Болтное (южная тайга, сложный пунктир) и ТР Средне-Васюганское (средняя тайга, пунктир). Шкалы: вертикальные – возраст (кал. л.н.), горизонтальные – единицы измерения соответствующих характеристик торфообразовательного процесса

Fig. 4. Time course of harmonics similar in period in changes in various characteristics of swamp formation in different zones / subzones of Western Siberia in the Holocene

а – harmonics with a period of about 2 500 years in changes in the moisture index in the Sredne-Vasyugskoe PC (middle taiga, solid line) and the Sherstobitovo PC (forest-steppe, dotted line) and harmonics with a period of about 1 000 years in changes in the rate of vertical growth of peat in the Sredne-Vasyugskoe PC (middle taiga, solid line) and the Khasyrey PC (forest-tundra, dotted line); б – harmonics with a period of about 2 500 years in changes in the rate of vertical growth of peat on the Boltnoe PS (southern taiga, complex dotted line) and the Sherstobitovo PC (forest-steppe, dotted line) and harmonics with a period of about 1 500 years in changes in $\delta^{13}\text{C}$ on the Boltnoe PC (southern taiga, complex dotted line) and the Sredne-Vasyugskoe PC (middle taiga, dotted line). Scales: vertical – age (cal. BP), horizontal – units of measurement of the corresponding characteristics of the peat-forming process

Помимо этого, исследования сезонной ритмики природных зон и подзон Западно-Сибирской равнины в [Окишева, Филандышева, 1997] показали, что на территориях Западной Сибири выше южной границы северной тайги контролирующим фактором эволюции природных ландшафтов является тепло, причем режим тепла в летний сезон, а южнее в тайге – соотношение тепла и влаги.

Расчеты показали, что даже на одном объекте, для одного и того же показателя в перечень ведущих гармоник попадают гармоники с близким масштабом изменчивости. Эти «биения» пока не получили своего объяснения, как нет и общепринятого мнения о том, являются ли циклы порядка 1 500 и 1 800–1 900 лет одним и тем же или это два разных цикла [Soon et al., 2014]. Возможно, в разные периоды голоцена может быть проявлено внешнее воздействие больших порядков, чем выявленные, что может усиливать или ослаблять тот или иной цикл. В некоторых работах, например, показано, что в раннем голоцене было более выраженным влияние солнечной активности в циклах 2 500 и 1 000 лет, а во второй половине голоцена стало наиболее выраженным колебание масштабом около 1 500 лет [Debret et al., 2009]. В других работах, например [Schulz et al., 1999], говорится, что цикл порядка 1 500 лет был более выражен до 4 000 л.н., а позже его период уменьшался. По данным [Viau et al., 2006], цикл порядка 1 000 лет также был выражен в наибольшей степени в раннем голоцене. Эти выводы вполне могут быть следствием разного временного разрешения и разной степени корректности реконструкций для раннего и позднего голоцена. Данная научная проблема еще ждет своего решения. Кроме того, состояния болот в разные периоды голоцена существенно отличались от современных, и их отклик на внешние влияния мог быть как существенно более чувствительным, так и более инертным, что проявлялось, соответственно, в более коротких или более длительных «биениях» цикла одного и того же порядка.

Заключение

Динамика болотообразования в Западной Сибири регулируется не только локальными и региональными факторами, в ней отражаются глобальные процессы изменения климата. Независимо от болота и зоны региона исследования режимы торфообразования в голоцене изменялись циклично, временной масштаб циклов соответствует известным характерным периодам колебаний палеоклимата, которые согласованы с порядком изменчивости солнечной активности в голоцене. Порядок выявленных циклов

совпадает также с циклами, выявленными для болот других регионов Северного полушария. Это свидетельствует как о влиянии на развитие болот Западной Сибири факторов планетарного масштаба, так и об индикаторном потенциале использованных характеристик болотообразовательного процесса для климатических реконструкций.

В наибольшей степени в Западной Сибири, независимо от зоны и подзоны, болотообразовательный процесс регулируется глобальными факторами в основном глобальном цикле голоцена, около 1 500 лет, а также в цикле около 1 000 лет.

Совпадения размерности циклов эволюции болот и солнечной активности, а также параметров болотообразования на разных участках между собой неабсолютное, наблюдается разброс периодов циклов до нескольких десятилетий. Некоторые циклы «выпадают» из характерных масштабов изменчивости болотных палеозкотопов. Это может быть следствием воздействия других внешних факторов, а также региональной специфики отклика на глобальные влияния.

Более согласован временной ход гармоник для процессов болотообразования зон средней тайги и лесостепи, чем той и другой с изменениями в южной тайге. Это подтверждает наш вывод [Прейс, 2015b, 2016] о более значительном нарушении болотообразовательного процесса в южной тайге прямым и косвенным влиянием палеокриогенных процессов, а также более чуткую реакцию южнотаежных болот на изменения климата и их высокую индикаторную значимость для палеконструкций при условии учета прекращения торфонакопления.

Наличие согласованности колебаний в эволюции природных объектов и внешних для них системорегулирующих факторов, а также закономерности их региональной асинхронности при предположении об устойчивости выявленных закономерностей могут быть использованы для развития и уточнения реконструкций климата Западной Сибири и Северного полушария, а также способны стать основой прогнозирования климата. Климатическая система во многом хаотична и никогда не повторяется в точности в своих состояниях. И, конечно, от цикла к циклу могут несколько меняться характеристики колебаний: период и амплитуда. Кроме того, природные объекты, в том числе болота, – это эволюционирующие системы, они существенно преломляют отклик на влияние внешних факторов в зависимости от стадии своего развития и состояния, а разные фазы развития болот могут соответствовать разной иерархии глобальных циклов климата. Но если мы имеем информацию об этой изменчивости за продолжительное время, то некоторая упорядоченность будет прояв-

ляться, и можно заметить, что линейность процессов выступает лишь этапами длительных циклов, характеристики которых мы можем позволить себе не учитывать только на коротких периодах.

Список источников

- Агатова А.Р., Назаров А.Н., Непоп Р.К., Орлова Л.А. Радиоуглеродная хронология гляциальных и климатических событий голоцена юго-восточного Алтая (Центральная Азия) // Геология и геофизика. 2012. Т. 53, № 6. С. 712–737. DOI: 10.1016/j.rgg.2012.04.004
- Антипина Т.Г., Прейс Ю.И., Зенин В.Н. Динамика лесной растительности и климата в южной тайге Западной Сибири в позднем голоцене по данным спорово-пыльцевого анализа и AMS-датирования торфяного разреза болотное // Экология. 2019. № 5. С. 356–364. DOI: 10.1134/S1067413619050035
- Бляхарчук Т.А., Бляхарчук П.А. Влияние цикличности климата на развитие болотного массива лесостепной зоны // Проблемы изучения и использования торфяных ресурсов Сибири : материалы Третьей междунар. науч.-практ. конф. (Томск, 27 сентября – 3 октября 2015 г.). Томск, 2015. С. 21–24. URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000530068>
- Букреева Г.Ф., Архипов С.А., Волкова В.С., Орлова Л.А. Климат Западной Сибири в прошлом и в будущем // Геология и геофизика. 1995. № 36 (11). С. 3–22. URL: <http://www.ipgg.sbras.ru/ru/files/publications/ibc/gg-1995-11-3.pdf?action=download>
- Вакуленко Н.В., Монин А.С., Сонечкин Д.М. Свидетельство внутренней упорядоченности колебаний климата в голоцене // Доклады Академии наук. 2003. Т. 389, № 5. С. 681–687.
- Волкова В.С., Гнибиденко З.Н., Горячева А.А. Климатическая ритмика голоцена центральной части Западно-Сибирской равнины (палинология, магнетизм) // Основные закономерности глобальных и региональных изменений климата и природной среды в позднем кайнозое Сибири. Новосибирск : Изд-во Ин-та археологии и этнографии СО РАН, 2002. С. 48–57.
- Гвоздецкий Н.А., Михайлов Н.И. Физическая география СССР. Азиатская часть : учебник для студентов геогр. фак. ун-тов. М. : Мысль, 1978. 512 с.
- Елина Г.А., Юрковская Т.К. Методы определения палеогидрологического режима как основа объективизации причин сукцессий растительности болот // Ботанический журнал. 1992. Т. 77, № 7. С. 120–124.
- Королюк А.Ю., Троева Е.И., Черосов М.М., Захарова В.И., Гоголева П.А., Миронова С.И. Экологическая оценка флоры и растительности Центральной Якутии. Якутск : Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2005. 108 с.
- Крутиков В.А., Прейс Ю.И., Кусков А.И., Чередыко Н.Н. Цикличность торфообразовательного процесса на юге лесной зоны Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 317. № 1. С. 46–51. URL: http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/3263/1/bulletin_tpu-2010-317-1-08.pdf
- Лапшина Е.Д. Флора болот юго-востока Западной Сибири. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2003. 296 с.
- Левина Т.П., Орлова Л.А. Климатические ритмы голоцена юга Западной Сибири // Геология и геофизика. 1993. Т. 34, № 3. С. 38–55.
- Лиштван И.И., Король Н.Т. Основные свойства торфа и методы их определения. Минск : Наука и техника, 1975. 318 с.
- Мальцев А.Е., Леонова Г.А., Рубанов М.В., Прейс Ю.И., Бобров В.А. Экогеохимия голоценовых разрезов верховых болот Барабинской лесостепи Западной Сибири (Новосибирская область) // Вопросы естествознания. 2018. № 3 (17). С. 86–92.
- Окишева Л.Н., Филандышева Л.Б. О климатическом факторе ландшафтной дифференциации Западно-Сибирской равнины // Вопросы географии Сибири. 1997. Вып. 22. С. 80–87.
- Поморцев О.А., Кашкаров Е.П., Ловелиус Н.В. Биоклиматическая хронология голоцена: реконструкция и прогноз // Вестник Северо-Восточного федерального университета имени М. К. Аммосова. 2015. № 3 (47). С. 100–115.
- Прейс Ю.И. Детальная реконструкция функционального состояния болота как отклик на изменения континентального климата голоцена (средняя тайга Западной Сибири) // Известия Томского политехнического университета. 2015а. Т. 326, № 2. С. 90–102. URL: http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/5439/1/bulletin_tpu-2015-326-2-10.pdf
- Прейс Ю.И. Палеокриогенные процессы в торфяных отложениях юго-востока Западной Сибири // Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы : труды Междунар. конф. (Тюмень, 2–5 июля 2015 г.) / под ред. В.П. Мельникова и Д.С. Дроздова. Тюмень : Эпоха, 2015б. С. 305–308.
- Прейс Ю.И. Динамика глядово-озерного комплекса Иксинского болота (Западная Сибирь) как отклик на изменения климата второй половины голоцена // География и природные ресурсы. 2016. № 2. С. 94–103. URL: <http://www.izdatgeo.ru/pdf/gipr/2016-2/94.pdf>
- Прейс Ю.И., Курьина И.В. Реконструкция высокого разрешения палеозокотопов болот южной тайги Западной Сибири как отклик на изменения климата голоцена // Исследование природно-климатических процессов на территории Большого Васюганского болота / под ред. М.В. Кабанова. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2012. С. 14–38.
- Тюренин С.Н., Ларгин И.Ф., Ефимова С.Ф., Скобеева Е.И. Торфяные месторождения и их разведка. М. : Недра, 1977. 264 с.
- Шнитников А.В. Изменчивость общей увлажненности материков Северного полушария. Л. : Изд-во Акад. наук СССР, 1957. С. 283–295.
- Bailey H.L., Kaufman D.S., Sloane H.J., Hubbard A.L., Henderson A.C.G., Leng M.J., Meyer H., Welker J.M. Holocene atmospheric circulation in the central North Pacific: a new terrestrial diatom and $\delta^{18}\text{O}$ dataset from the Aleutian Islands // Quaternary Science Reviews. 2018. V. 194. P. 27–38. DOI: 10.1016/j.quascirev.2018.06.027
- Bond G., Showers W., Cheseby M., Lotti R., Almasi P., de Menocal P., Priore P., Cullen H., Hajdas I., Bonani G. A pervasive millennial-scale cycle in the North Atlantic Holocene and glacial climates // Science. 1997. V. 278. P. 1257–1266. DOI: 10.1126/science.278.5341.1257
- Borgmark A. Holocene climate variability and periodicities in south-central Sweden, as interpreted from peat humification analysis // The Holocene. 2005. V. 15, is. 3. P. 387–395. DOI: 10.1191/0959683605hl816rp
- Carlsaw K.S., Harrison R.G., Kirkby J. Cosmic rays, clouds, and climate // Science. 2002. V. 298, is. 5599. P. 1732–1737. DOI: 10.1126/science.1076964

- Debret M., Sebag D., Crosta X., Massei N., Petit J.-R., Chapron E., Bout-Roumazielles V.** Evidence from wavelet analysis for a mid-Holocene transition in global climate forcing // *Quaternary Science Reviews*. 2009. V. 28, is. 25–26. P. 2675–2688. DOI: 10.1016/j.quascirev.2009.06.005.
- IPCC.** Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / ed. T.F. Stocker et al. Cambridge : Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
- Langdon P.G., Barber K.E., Hughes P.D.M.** A 7500-year peat-based palaeoclimatic reconstruction and evidence for an 1100-year cyclicity in bog surface wetness from Temple Hill Moss, Pentland Hills, southeast Scotland // *Quaternary Science Reviews*. 2003. V. 22, is. 2–4. P. 259–274. DOI: 10.1016/S0277-3791(02)00093-8
- Nederbragt A.J., Thurow J.** Geographic coherence of millennial-scale climate cycles during the Holocene // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2005. V. 221, is. 3–4. P. 313–324. DOI: 10.1016/j.palaeo.2005.03.002
- Petterson O.** Climatic variations in historic and prehistoric times // *Svenska Hydrogr. Biol. Kommissionens Skrifter*. 1914. V. 5. 26 p.
- Preis Yu.I., Simonova G.V., Slogoda E.A.** Detailed reconstruction of the functional state of the Central Yamal khasyrey as a response to local conditions and regional climate changes in the late Holocene // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2016. V. 48. Art. 012010. doi: 10.1088/1755-1315/48/1/012010. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/48/1/012010/pdf>
- Pudovkin M.I.** Influence of solar activity on the lower atmosphere state // *Intern. J. Geomagn. Aeron.* 2004. V. 5 (2). GI2007. DOI: 10.1029/2003GI000060
- Schulz M., Berger W.H., Sarnthein M., Grootes P.M.** Amplitude variations of 1470-year climate oscillations during the last 100,000 years linked to fluctuations of continental ice mass // *Geophysical Research Letters*. 1999. V. 26. P. 3385–3388.
- Schweinsberg A.D., Briner J.P., Miller G.H., Bennike O., Thomas E.K.** Local glaciation in West Greenland linked to North Atlantic ocean circulation during the Holocene // *Geology*. 2017. V. 45. P. 195–198. DOI: 10.1130/G38114.1
- Soon W., Herrera V.M.V., Selvaraj K., Traversi R., Usoskin I., Chen C.-T.A., Lou J.-Y., Kao S.-J., Carter R.M., Pipin V., Severi M., Becagli S.** A review of Holocene solar-linked climatic variation on centennial to millennial timescales: Physical processes, interpretative frameworks and a new multiple cross-wavelet transform algorithm // *Earth-Science Reviews*. 2014. V. 134. P. 1–15. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.03.003
- Stuiver M., Reimer P.J.** CALIB 7.0.4 Calib Radiocarbon Calibration Program. 2005.
- Stuiver M., Reimer P.J., Reimer R.W.** CALIB 7.0.4 Manual. 2007. URL: <http://www.calib.qub.ac.uk/crev50/manual/> (accessed: 21.02.2011).
- Svensmark H., Enghoff M.B., Shaviv N.J., Svensmark H.** The response of clouds and aerosols to cosmic ray decreases // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016. V. 121, is. 9. P. 8152–8181.
- Swindles G.T., Patterson R.T., Roe H.M., Galloway J.M.** Evaluating periodicities in peat-based climate proxy records // *Quaternary Science Reviews*. 2012. V. 41. P. 94–103. DOI: 10.1016/j.quascirev.2012.03.003. URL: <https://carleton.ca/timpatterson/wp-content/uploads/Swindles2012QSR41.94-103.pdf>
- Turner T.E., Swindles G.T., Charman D.J., Langdon P.G., Morris P.J., Booth R.K., Parry L.E., Nichols J.E.** Solar cycles or random processes? Evaluating solar variability in Holocene climate records // *Scientific Reports*. 2016. V. 6. Art. 23961. DOI: 10.1038/srep23961
- Usoskin I.G., Gallet Y., Lopes F., Kovaltsov G.A., Hulot G.** Solar activity during the Holocene: the Hallstatt cycle and its consequence for grand minima and maxima // *Astronomy & Astrophysics*. 2016. V. 578. DOI: 10.1051/0004-6361/201527295.
- Viau A.E., Gajewski K., Sawada M.C., Fines P.** Millennial-scale temperature variations in North America during the Holocene // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. Art. D09102. DOI: 10.1029/2005JD006031
- Vonmoos M., Beer J., Muscheler R.** Large variations in Holocene solar activity: Constraints from ¹⁰Be in the Greenland ice core project ice core // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. A10105. DOI: 10.1029/2005JA011500
- Wanner H., Beer J., Büttikofer J., Crowley T.J., Cubasch U., Flückiger J., Goussé H., Grosjean M., Joos F., Kaplan J.O., Küttel M., Müller S.A., Prentice C.I., Solomina O., Stocker T.F., Tarasov P., Wagner M., Widmann M.** Mid- to Late Holocene climate change: an overview // *Quaternary Science Reviews*. 2008. V. 27, is. 19–20. P. 1791–1828. DOI: 10.1016/j.quascirev.2008.06.013
- Wiles G.C., D'Arrigo R.D., Villalba R., Calkin P.E., Barclay D.J.** Century-scale solar variability and Alaskan temperature change over the past millennium // *Geophysical Research Letters*. 2004. V. 31. L15203. DOI: 10.1029/2004GL020050
- Wunsch C.** On sharp spectral lines in the climate record and the millennial peak // *Paleoceanography*. 2000. V. 15 (4). P. 417–424. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/1999PA000468>
- Xu H., Hong Y., Lin Q., Hong B., Zhu Y.** Temperature variations in the past 6000 years inferred from $\delta^{18}\text{O}$ of peat cellulose from Hongyuan, China // *Chinese Science Bulletin*. 2002. V. 47. P. 1578–1584. DOI: 10.1360/02tb9347
- Xu D., Lu H., Chu G., Wu N., Shen C., Wang C., Mao L.** 500-year climate cycles stacking of recent centennial warming documented in an East Asian pollen record // *Scientific Reports*. 2014. V. 4. Art. 3611. doi: 10.1038/srep03611
- Zhao X.H., Feng X.S.** Correlation between solar activity and the local temperature of Antarctica during the past 11,000 years // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2015. V. 122. P. 26–33. DOI: 10.1016/j.jastp.2014.11.004.

References

- Agatova A.R., Nazarov A.N., Nepov R.K., Orlova L.A. Radiocarbon chronology of holocene glacial and climatic events in south-eastern Altai (Central Asia) // *Russian Geology and Geophysics*. 2012. T. 53. Is. 6. pp. 712–737. doi.org/10.1016/j.rgg.2012.04.004.
- Antipina T.G., Preis Y.I., Zenin V.N. Dynamics of forest vegetation and climate in the southern taiga of Western Siberia in the late Holocene according to spore–pollen analysis and AMS dating of the peat bog // *Russian Journal of Ecology*. 2019. T. 50. No. 5. pp. 445–452. doi.org/10.1134/S1067413619050035.
- Blyakharchuk T. A., Blyakharchuk P. A. *Vliyanie ciklichnosti klimata na razvitie bolotnogo massiva lesostepnoj zony* [Influence of climatic cycles on development of peat mire in forest-steppe zone] // *Problems of studying and using peat resources of Siberia : materials of the Third International Scientific and Practical Conference (Tomsk, September 27 – October 3, 2015)*. 2015. pp. 21–24. In Russian. URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000530068> In Russian

- Bukreeva G.F., Arkhipov S.A., Volkova V.S., Orlova L.A. *Klimat Zapadnoj Sibiri v proshlom i v budushchem* [Climate of Western Siberia: past and future] // Russian Geology and Geophysics. 1995. T. 36. Is. 11. pp. 3–22. In Russian. URL: <http://www.ipgg.sbras.ru/ru/files/publications/ibc/gg-1995-11-3.pdf?action=download>
- Vakulenko N.V., Monin A.S., Sonechkin D.M. *Svidetel'stvo vnutrennej uporyadochennosti kolebanij klimata v golocene* [Evidence of a method order in the Holocene climate variations] // Doklady Earth Sciences. 2003. T. 389. No. 5. pp. 681–687. In Russian
- Volkova V.S., Gnibidenko Z.N., Goryacheva A.A. *Klimaticheskaya ritmika golocena central'noj chasti Zapadno-Sibirskoj ravniny (palinologiya, magnetizm)* [Holocene climatic rhythm in the central part of the West Siberian Plain (palynology, magnetism)] // The main patterns of global and regional changes in climate and natural environment in the Late Cenozoic of Siberia. Novosibirsk: Publishing house of the Institute of Archeology and Ethnography SB RAS, 2002. pp. 48–57. In Russian
- Gvozdeckij N.A., Mihajlov N.I. *Fizicheskaya geografiya SSSR. Aziatskaya chast'*: Uchebnik dlya studentov geogr. fak. un-tov. Moscow : Mysl', 1978. 512 p. In Russian
- Elina G.A., Yurkovskaya T.K. *Metody opredeleniya paleogidrologicheskogo rezhima kak osnova ob'ektivizacii prichin sukcesij rastitel'nosti bolot* [Methods for determining the paleohydrological regime as the basis for objectifying the causes of succession of bog vegetation] // Botanical Journal. 1992. T. 77. Is. 7. pp. 120–124. In Russian
- Korolyuk, A.Yu., Troeva E.I., Cherosov M. M., Zakharova B.I., Gogoleva P.A., Mironova S.I. *Ekologicheskaya otsenka flory i rastitelnosti Tsentralnoj Yakutii* [Ecological assessment of flora and vegetation of Central Yakutia]. Yakutsk: Izd-vo YaNTs SO RAN, 2005. 108 p. In Russian
- Krutikov V.A., Preis Yu.I., Kuskov A.I., Cheredko N.N. *Ciklichnost' torfoobrazovatel'nogo processa na yuge lesnoj zony Zapadnoj Sibiri* // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [Cyclicity of the peat-forming process in the south of the forest zone of Western Siberia] // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. 2010. T. 317. Is. 1. pp. 46–51. In Russian. URL: http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/3263/1/bulletin_tpu-2010-317-1-08.pdf
- Lapshina E.D. *Flora bolot yugo-vostoka Zapadnoj Sibiri* [Flora of mires of south-east of West Siberia]. Tomsk: Izd-vo Tomskogo un-ta, 2003. 296 p. In Russian
- Levina T.P., Orlova L.A. *Klimaticheskie ritmy golocena yuga Zapadnoj Sibiri* [Holocene climatic cycles in southern West Siberia] // Russian Geology and Geophysics. 1993. T. 34. Is. 3. pp. 38–55. In Russian
- Lishtvan I.I., King N.T. *Osnovnye svoystva torfa i metody ih opredeleniya* [The main properties of peat and methods for their determination]. Minsk: Science and technology, 1975. 318 p. In Russian
- Maltsev A.E., Leonova G.A., Rubanov M.V., Preis Y.I., Bobrov V.A. *Ekogeohimiya golocenovykh razrezov verkhovykh bolot Barabinskoj lesostepi Zapadnoj Sibiri (Novosibirskaya oblast')* [Ecogeochemistry of Holocene sections of the raised bogs of the Barabinsk forest-steppe of Western Siberia (Novosibirsk region)] // Problems of Natural Science. 2018. V. 3. Is. 17. pp. 86–92. In Russian
- Okisheva L.N., Filandysheva L.B. *O klimaticheskome faktore landshaftnoj differenciacii Zapadno-Sibirskoj ravniny* [On the climatic factor of the landscape differentiation of the West Siberian Plain] // Problems of Geography of Siberia. 1997. Is. 22. pp. 80–87. In Russian
- Pomortsev O.A., Kashkarov E.P., Lovelius N.V. *Bioklimaticheskaya hronologiya golocena: rekonstrukciya i prognoz* [Bioclimatic Chronology of the Holocene: Reconstruction and Prognosis] // Vestnik of the North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov. 2015. Is. 3 (47). pp. 100–115. In Russian
- Preis Yu.I. *Detal'naya rekonstrukciya funkcional'nogo sostoyaniya bolota kak otklik na izmeneniya kontinental'nogo klimata golocena (srednyaya tajga Zapadnoj Sibiri)* [Detailed reconstruction of bog functional state as response to continental climate changes in Holocene (the middle taiga of West Siberia)] // Izvestiya Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta. 2015a. T. 326. No. 2. pp. 90–102. In Russian. URL: http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/5439/1/bulletin_tpu-2015-326-2-10.pdf
- Preis Yu.I. *Paleokriogennyye processy v torfnykh otlozheniyakh yugo-vostoka Zapadnoj Sibiri* [Paleocryogenic processes in peat deposits in the southeast of Western Siberia] // Arctic, Subarctic: mosaicity, contrast, variability of the cryosphere: proceedings of the International Conference (Tyumen, July 2–5, 2015) / ed. V.P. Melnikov and D.S. Drozdov. Tyumen: Epoch Publishing House. 2015b. pp. 305–308. In Russian
- Preis Yu. I. Dynamics of the hollow-pool complex of the Iksinskoe bog (Western Siberia) as a response to climate changes in the latter half of the Holocene // Geography and Natural Resources. 2016. No. 2. pp. 94–103. URL: <http://www.izdatgeo.ru/pdf/gipr/2016-2/94.pdf>
- Preis Yu.I., Kur'ina I.V. *Rekonstrukciya vysokogo razresheniya paleoekotopov bolot yuzhnoj tajgi Zapadnoj Sibiri kak otklik na izmeneniya klimata golocena* [Reconstruction of high resolution paleoecotopes of bogs in the southern taiga of Western Siberia as a response to changes in the Holocene climate] // Investigation of natural and climatic processes in the territory of the Bolshoi Vasyugan bog / ed. M.V. Kabanova. Novosibirsk: Publishing house of the SB RAS, 2012. pp. 14–38. In Russian
- Tyuremnov S.N., Largin I.F., Efimova S.F., Skobeleva E.I. *Torfnyanye mestorozhdeniya i ih razvedka* [Peat Deposits and Their Exploration]. Moscow : Nedra, 1977. 264 p. In Russian
- Shnitnikov A.V. *Izmenchivost' obshchej uvlazhnennosti materikov Severnogo polushariya* [Variability of the general moisture content of the continents of the Northern Hemisphere]. Leningrad: Publishing house of the Academy of Sciences of the USSR, 1957. pp. 283–295. In Russian
- Bailey H.L., Kaufman D.S., Sloane H.J., Hubbard A.L., Henderson A.C.G., Leng M.J., Meyer H., Welker J.M. Holocene atmospheric circulation in the central North Pacific: A new terrestrial diatom and $\delta^{18}\text{O}$ dataset from the Aleutian Islands // Quaternary Science Reviews. 2018. V. 194. pp. 27–38. doi:10.1016/j.quascirev.2018.06.027.
- Bond G., Showers W., Cheseby M., Lotti R., Almasi P., de Menocal P., Priore P., Cullen H., Hajdas I., Bonani G. A pervasive millennial-scale cycle in the North Atlantic Holocene and glacial climates // Science. 1997. V. 278. pp. 1257–1266. doi:10.1126/science.278.5341.1257
- Borgmark A. Holocene climate variability and periodicities in south-central Sweden, as interpreted from peat humification analysis // The Holocene. 2005 V. 15. Is. 3. pp. 387–395. doi:10.1191/0959683605hl816p

- Carslaw K.S., Harrison R.G., Kirkby J. Cosmic rays, clouds, and climate // *Science*. 2002. V. 298. Is. 5599. pp. 1732–1737. doi: 10.1126/science.1076964.
- Debret M., Sebag D., Crosta X., Massei N., Petit J.-R., Chapron E., Bout-Roumazielles V. Evidence from wavelet analysis for a mid-Holocene transition in global climate forcing // *Quaternary Science Reviews*. 2009. V. 28. Is. 25–26. pp. 2675–2688. doi.org/10.1016/j.quascirev.2009.06.005.
- IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / ed T F Stocker et al. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
- Langdon P.G., Barber K.E., Hughes P.D.M. A 7500-year peat-based palaeoclimatic reconstruction and evidence for an 1100-year cyclicity in bog surface wetness from Temple Hill Moss, Pentland Hills, southeast Scotland // *Quaternary Science Reviews*. 2003. V. 22. Is. 2–4. pp. 259–274. doi.org/10.1016/S0277-3791(02)00093-8.
- Nederbragt A.J., Thurow J. Geographic coherence of millennial-scale climate cycles during the Holocene // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2005. V. 221. Is. 3–4. pp. 313–324. doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.03.002.
- Pettersson O. Climatic variations in historic and prehistoric times // *Svenska Hydrogr. Biol. Kommissionens Skrifter*. 1914. V. 5. 26 p.
- Preis Yu.I., Simonova G.V. and Slagoda E.A. Detailed reconstruction of the functional state of the Central Yamal khasyrey as a response to local conditions and regional climate changes in the late Holocene // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2016. V. 48, № 012010. doi: 10.1088/1755-1315/48/1/012010. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/48/1/012010/pdf>
- Pudovkin M.I. Influence of solar activity on the lower atmosphere state // *Intern. J. Geomagn. Aeron.* 2004. V. 5 (2). G12007. doi: 10.1029/2003GI000060.
- Schulz M., Berger W.H., Sarnthein M., Grootes P.M. Amplitude variations of 1470-year climate oscillations during the last 100,000 years linked to fluctuations of continental ice mass // *Geophysical Research Letters*. 1999. V. 26. pp. 3385–3388.
- Schweinsberg A.D., Briner J.P., Miller G.H., Bennike O., Thomas E.K. Local glaciation in West Greenland linked to North Atlantic ocean circulation during the Holocene // *Geology*. 2017. V. 45. pp. 195–198. doi.org/10.1130/G38114.1.
- Soon W., Herrera V.M.V., Selvaraj K., Traversi R., Usoskin I., Chen C.-T.A., Lou J.-Y., Kao S.-J., Carter R.M., Pipin V., Severi M., Becagli S. A review of Holocene solar-linked climatic variation on centennial to millennial timescales: Physical processes, interpretative frameworks and a new multiple cross-wavelet transform algorithm // *Earth-Science Reviews*. 2014. V. 134. pp. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.03.003>.
- Stuiver M., Reimer P.J. CALIB 7.0.4 Calib Radiocarbon Calibration Program. 2005.
- Stuiver M., Reimer P.J., Reimer R.W. CALIB 7.0.4 Manual. 2007. URL: <http://www.calib.qub.ac.uk/crev50/manual/> (accessed: 21.02.2011).
- Svensmark J., Enghoff M.B., Shaviv N.J., Svensmark H. The response of clouds and aerosols to cosmic ray decreases // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016. V. 121. Is. 9. pp. 8152–8181.
- Swindles G.T., Patterson R.T., Roe H.M., Galloway J.M. Evaluating periodicities in peat-based climate proxy records // *Quaternary Science Reviews*. 2012. V. 41. pp. 94–103. doi: 10.1016/j.quascirev.2012.03.003. URL: <https://carleton.ca/timpatterson/wp-content/uploads/Swindles2012QSR41.94-103.pdf>
- Turner T.E., Swindles G.T., Charman D.J., Langdon P.G., Morris P.J., Booth R.K., Parry L.E., Nichols J.E. Solar cycles or random processes? Evaluating solar variability in Holocene climate records // *Scientific Reports*. 2016. V. 6. 23961. doi: 10.1038/srep23961.
- Usoskin I.G., Gallet Y., Lopes F., Kovaltsov G.A., Hulot G. Solar activity during the Holocene: the Hallstatt cycle and its consequence for grand minima and maxima // *Astronomy & Astrophysics*. 2016. V. 578. doi.org/10.1051/0004-6361/201527295.
- Viau A.E., Gajewski K., Sawada M.C., Fines P. Millennial-scale temperature variations in North America during the Holocene // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. pp. D09102. doi.org/10.1029/2005JD006031.
- Vonmoos M., Beer J., Muscheler R. Large variations in Holocene solar activity: Constraints from ^{10}Be in the Greenland ice core project ice core // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. A10105. doi:10.1029/2005JA011500.
- Wanner H., Beer J., Bütikofer J., Crowley T.J., Cubasch U., Flückiger J., Goosse H., Grosjean M., Joos F., Kaplan J.O., Küttel M., Müller S.A., Prentice C.I., Solomina O., Stocker T.F., Tarasov P., Wagner M., Widmann M. Mid- to Late Holocene climate change: an overview // *Quaternary Science Reviews*. 2008. V. 27. Is. 19–20. pp. 1791–1828. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.06.013>.
- Wiles G.C., D'Arrigo R.D., Villalba R., Calkin P.E., Barclay D.J. Century-scale solar variability and Alaskan temperature change over the past millennium // *Geophysical Research Letters*. 2004. V. 31. L15203. doi:10.1029/2004GL020050.
- Wunsch C. On sharp spectral lines in the climate record and the millennial peak // *Paleoceanography*. 2000. V. 15. 4. pp. 417–424. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/1999PA000468>
- Xu H., Hong Y., Lin Q., Hong B., Zhu Y. Temperature variations in the past 6000 years inferred from $\delta^{18}\text{O}$ of peat cellulose from Hongyuan, China // *Chinese Science Bulletin*. 2002. V. 47. pp. 1578–1584. <https://doi.org/10.1360/02tb9347>.
- Xu D., Lu H., Chu G., Wu N., Shen C., Wang C., Mao L. 500-year climate cycles stacking of recent centennial warming documented in an East Asian pollen record // *Scientific Reports*. 2014. V. 4. 3611. DOI: 10.1038/srep03611.
- Zhao X.H., Feng X.S. Correlation between solar activity and the local temperature of Antarctica during the past 11,000 years // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2015. V. 122. pp. 26–33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2014.11.004>.

Информация об авторах:

Прайс Ю.И., кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (ИМКЭС СО РАН), Томск, Россия.

E-mail: preisuyi@rambler.ru

Чередыко Н.Н., кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (ИМКЭС СО РАН), Томск, Россия.

E-mail: atnik3@rambler.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Preis Y.I., Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia.

E-mail: preisyui@rambler.ru

Cheredko N.N., Cand. Sci. (Geography), Senior Researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia.

E-mail: atnik3@rambler.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 02.08.2021; одобрена после рецензирования 28.09.2021; принята к публикации 14.06.2022

The article was submitted 02.08.2021; approved after reviewing 28.09.2021; accepted for publication 14.06.2022