

## МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.345

### СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ И РЕКОНСТРУИРОВАННЫХ ПАЛЕОТЕМПЕРАТУР В ПОСЛЕДНИЙ ЛЕДНИКОВЫЙ МАКСИМУМ В РОССИЙСКОЙ АРКТИКЕ

Г.В. Суркова<sup>1</sup>, Ю.К. Васильчук<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет

<sup>1</sup> Кафедра метеорологии и климатологии, проф., д-р геогр. наук; e-mail: galina\_surkova@mail.ru

<sup>2</sup> Кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, проф., д-р геол.-минерал. наук; e-mail: vasilch\_geo@mail.ru

Работа посвящена сравнительному анализу независимых реконструкций температурного режима холодного периода последнего позднеледникового оледенения (18–21 тыс. лет назад), крупнейшего в Российской Арктике, по данным изотопного анализа и результатов численного моделирования. В исследовании использованы данные численных экспериментов климатических моделей земной системы проекта RMP3 и результаты температурной реконструкции, выполненной по изотопному составу сингенетических повторно-жильных льдов ( $\delta^{18}\text{O}$ ). Показано, что в некоторых районах имеются существенные различия температуры, реконструированной по изотопным данным, и температуры, полученной по данным моделирования. В частности, выявлено, что по мере удаления от предполагаемого ледникового покрова различия в моделируемых и реконструированных температурах уменьшаются, что позволяет сделать заключение о значимом влиянии точности задаваемого в моделях расположения ледникового покрова на итоговые результаты моделирования.

В частности, разные подходы в палеоклиматических исследованиях приводят к довольно различающимся оценкам площади континентальных и шельфовых льдов той эпохи. Площадь ледников и их свойства учитываются в моделях климата при расчетах. Показано, что для качественного моделирования очень важно уточнять палеорекострукции, выполненные по косвенным климатическим источникам.

**Ключевые слова:** позднеледниковое оледенение, температура воздуха, холодный сезон, Арктика, изотопные и модельные реконструкции

DOI: 10.55959/MSU0579-9414-5-2022-6-40-48

#### ВВЕДЕНИЕ

Общий рост температуры воздуха в Арктике на протяжении голоцена подтверждается результатами многочисленных палеоклиматических исследований, основанных на косвенных данных и их связи с климатом. Начиная с XIX в., инструментальные метеорологические наблюдения позволили создать длинные ряды прямых измерений и дать детальные количественные оценки современных региональных и глобальных изменений климата. Результаты анализа многолетних данных измерений за последние столетия свидетельствуют о колебаниях температурного режима разного временного масштаба (от квазидвухлетних колебаний до процессов с периодичностью в несколько десятилетий), на фоне которых в последние 100–150 лет фиксируется довольно быстрый и статистически значимый рост средней глобальной температуры приземного воз-

духа. С наибольшей скоростью потепление происходит в Арктике. Как над сушей, так и над акваториями арктических морей его величина примерно в два раза больше, чем в среднем по планете [Алексеев, 2015; Второй..., 2014; IPCC..., 2013; Доклад..., 2020; Boeke, Taylor, 2018; Serreze, Barry, 2011 и др.].

Для построения долгосрочных стратегий государственного планирования экономики и различных отраслей хозяйства, а также контроля состояния окружающей среды необходимо, наряду с другими факторами, располагать данными не только фактических измерений, но и результатами климатического прогноза на десятилетия вперед [Эколого-географические..., 2011; Влияние изменений..., 2013]. Одним из важнейших современных инструментов, позволяющих количественно оценивать возможные изменения климата при тех или иных сценариях комплекса естественных внутренних и внешних климатообра-

зующих факторов, а также антропогенного влияния являются климатические модели земной системы [Володин, 2007; Кислов, Суркова, 2020; Voeke, Taylor, 2018]. Для выстраивания сценариев будущего климата и подтверждения качества моделирования климатических проекций требуется проверка моделей, точности воспроизведения ими современного климата. Но еще одной важной задачей является понимание механизмов взаимодействия различных компонентов климатической системы, формирующих климат на масштабах времени, превышающих данные прямых метеорологических измерений. Инструмент для решения этих задач дает сравнение независимых палеоклиматических реконструкций, выполненных по косвенным оценкам климата методами изотопного и палинологического анализа, дендрохронологии, исследования океанических и ледниковых кернов и т. д., с результатами моделирования климатической системы для тех или иных сценариев.

Крупнейшим международным проектом последних десятилетий по организации единого типа численных экспериментов и сопоставлению данных моделирования в разные климатические эпохи прошлого стал проект PMIP (Paleoclimate Modeling Intercomparison Project). В настоящей работе использованы данные третьего этапа, PMIP3, эксперимент LGM (Last Glacial Maximum), 21 тыс. л. н., и контрольный эксперимент для современного климата [Braconnot et al., 2011, 2012; Taylor et al., 2012]. Подробное описание результатов этого проекта представлено в разделе о материалах и методах исследования. Среди крупных проектов последних лет, посвященных изучению механизмов смены климата ледниковых и межледниковых эпох, стоит отметить проект PalMod (<https://www.palmod.de/>), а также работы российских ученых РАН и университетов.

Низкие температуры воздуха в эпоху последнего позднеледникового оледенения (18–21 тыс. л. н.) формировались под воздействием разных факторов, среди которых одним из важных являлось состояние и площадь криолитозоны. В частности, более широкое по сравнению с современным распространением зоны континентальных ледниковых щитов, морских льдов и многолетнемерзлых пород. Дефицит палеоклиматических данных до сих пор оставляет место для дискуссии относительно площади континентальных и шельфовых ледников и их расположения в этот период, например [Hughes et al., 2016]. Такая неоднозначность усложняет задачу климатических палеореконокструкций, в том числе с использованием численных моделей климата, поскольку в качестве одного из показателей граничных условий при проведении расчетов задаются характеристики оледенения. Чем больше погрешность этих показателей (площади

ледников, их расположение), тем меньшая определенность возникает и в модельных результатах. Отсюда, с одной стороны, при задании максимально реалистичных граничных условий необходимо использовать косвенные данные о состоянии климатической системы (атмосферы, гидросферы, криосферы, биосферы) по результатам исследований в смежных областях палеогеографии для определенного среза палеовремени. С другой стороны, проверка результатов палеоклиматического моделирования возможна при сопоставлении расчетов с косвенными показателями состояния атмосферы.

Один из источников информации о температурном режиме в разные климатические эпохи, используемый в данной работе, – содержание стабильных изотопов кислорода  $^{18}\text{O}$  и водорода  $^2\text{H}$  в составе сингенетических повторно-жильных льдов. Ранее было показано [Васильчук, 1992; Vasil'chuk, 1991], что величины  $\delta^{18}\text{O}$  в ростках современных ледяных жил хорошо коррелируют со значениями средней январской температуры приземного воздуха и суммами отрицательных средних суточных температур холодного сезона. Физическая основа такой зависимости базируется на том, что основным источником формирования ледяных жил служит талая весенняя вода, поэтому их изотопный состав в значительной мере соответствует изотопному составу снега, накапливающемуся на полигональном массиве за зиму [Васильчук и др., 2021]. В работе [Васильчук, Суркова, 2020] ранее выявленные уравнения связи были подтверждены с использованием более длинного ряда современных данных (1930–2017). Это дало возможность выполнить дальнейшую сравнительную оценку результатов палеоклиматических реконструкций температурного режима холодного сезона в арктической зоне России для периода максимума позднеледникового оледенения по двум различным источникам: изотопному составу сингенетических повторно-жильных льдов (ПЖЛ) и данным численных экспериментов, выполненных с использованием глобальных моделей климата в рамках международного эксперимента PMIP3/CMIP5 [Taylor et al., 2012].

В настоящей работе представлены результаты сопоставления палеотемпературных реконструкций, выполненных по данным содержания стабильных изотопов кислорода  $^{18}\text{O}$  в сингенетических повторно-жильных льдах и результатов численных экспериментов PMIP3/CMIP5 для позднеледникового оледенения.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Работа основана на двух независимых источниках данных о средней температуре воздуха для максимума позднеледникового оледенения (18–

21 тыс. л. н.) для холодного сезона. Под холодным сезоном понимается период, когда многолетняя средняя суточная температура устойчиво переходит от положительных значений к отрицательным. Оценка температурных характеристик холодного сезона выполнялась по данным:

- изотопного состава едомных повторно-жильных льдов ( $\delta^{18}\text{O}$ ) [Васильчук, 1992; Vasil'chuk, 2014];

- результатов численных экспериментов моделей климатической системы в рамках международного проекта Paleoclimate Modelling Intercomparison Project, третий этап PMIP3, эксперимента LGM (Last Glacial Maximum), 21 тыс. л. н., и контрольного эксперимента для современного климата [Braconnot et al., 2011, 2012]. В качестве контрольного эксперимента, характеризующего современный климат, рассматривался эксперимент Historical [Taylor, 2012], где изменение внешних воздействий на климат задано в соответствии с наблюдениями.

Едома – это сильнольדיстые, содержащие более 50–90% льда, как правило, богатые органическим материалом (содержащие более 1–2% органики), иловатые и пылеватые супесчаные и мелкопесчаные позднеплейстоценовые отложения, вмещающие мощные (высотой до 15–20 м и более и шириной 1–3,5 м), нередко многоярусные, сингенетические повторно-жильные льды. Возраст едомных толщ варьирует от 12 до 50 калиброванных тыс. лет и старше. Едома представляет собой своеобразную лакмусовую бумагу – она является одним из лучших континентальных индикаторов палеотемпературы. Основным источником, питающим повторно-жильные льды, является талая снеговая вода, попадающая в морозобойные трещины ранней весной. Поэтому изотопный состав повторно-жильных льдов ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{пжл}}$ ) практически напрямую связан со средней температурой приземного воздуха ( $t_{\text{сп.хол}}$ ) холодного периода ( $^{\circ}\text{C}$ ), что нашло отражение в соответствующем уравнении, полученном Ю.К. Васильчуком [Vasil'chuk, 1991]:

$$t_{\text{сп.хол}} = \delta^{18}\text{O}_{\text{пжл}} (\pm 2^{\circ}\text{C}).$$

Многолетнемерзлое состояние отложений и жильного льда обеспечивает полную сохранность изотопного сигнала, который сохраняется в жилах десятки тыс. лет в неизменном виде.

Из архива глобальных данных проекта PMIP3 были выбраны значения приземной температуры воздуха для территории Арктики по 12 моделям климата (табл. 1). Модели такого типа являются в настоящее время одним из наиболее значимых методов исследования климата и динамики атмосферы [Володин, 2007]. В них стараются учитывать все основные климатообразующие процессы наиболее полным на данный момент способом, учитывая все

компоненты климатической системы. Поэтому такие модели в настоящее время стали также называть моделями земной системы [Математическое моделирование..., 2016]. Основа моделей – эволюционные уравнения гидротермодинамики, поэтому проведение численного эксперимента требует задания начального состояния климатической системы и расчет этого состояния в последующие моменты времени на заданном временном интервале. Среди результатов расчетов десятки показателей состояния климатической системы, в том числе атмосферное давление, температура воздуха, атмосферные осадки, скорость и направление ветра, характеристики радиационного баланса и др.

Ключевыми особенностями граничных условий для модельных расчетов климата по сценарию LGM являются обширное распространение континентальных и морских льдов в Северном полушарии [Abe-Ouchi et al., 2015] (самые крупные ледниковые щиты – Лаврентийский, Кордильерский, Скандинавский и шельфа Баренцева моря) и пониженная концентрация парниковых газов (концентрация  $\text{CO}_2$  составляла  $185 \text{ млн}^{-1}$ , метана –  $350 \text{ млрд}^{-1}$ , оксида азота  $\text{N}_2\text{O}$  –  $200 \text{ млрд}^{-1}$ ). Подробное описание структуры эксперимента приводится на официальной странице PMIP [PMIP3, 2022].

В настоящей работе основное внимание уделено вопросу сравнения результатов численных экспериментов проекта PMIP3/CMIP5 и палеотемпературных реконструкций, выполненных по стабильным изотомам кислорода. В расчетных экспериментах PMIP3/CMIP5 все модели использовали единые граничные условия по площади и высоте покровного оледенения [Abe-Ouchi et al., 2015]. Согласно этому сценарию, южная граница материкового оледенения в эпоху позднеплейстоценового максимума в Евразии местами простиралась до  $50^{\circ}$  с. ш. Но это не единственный (и не самый лучший) вариант реконструкции площади оледенения в этот период. В частности, в работе [Hughes et al., 2016] положение последнего Евразийского ледникового покрова определено на основании хронологической базы данных более 5 тыс. радиоуглеродных и других определений возраста позднечетвертичных отложений из более чем 2,5 тыс. местоположений. На основании этих данных предлагается иная версия, которая предполагает, что площадь ледника была существенно меньше, чем в работе [Abe-Ouchi et al., 2015]. Серия карт, созданная [Hughes et al., 2016], показывает, что южная граница последнего Евразийского ледникового покрова 20–18 тыс. л. н. на территории Восточной Европы располагалась около  $60^{\circ}$  с. ш., а его восточный край находился в море заметно западнее Ямала, что говорит о существенно меньшем влиянии ледникового покрова в это время на климат Ямала и восточных

районов Сибири. Почти 70% значений возрастных определений (3756) – это радиоуглеродные датировки [Hughes et al., 2016], из них наземных – 2012, а морских – 1744. Причем подавляющее число наземных датировок выполнено по органическому материалу (стволам и корням деревьев, хвое, торфу, часто с неразложившимися остатками мхов, орешками и семенами растений, скелетами и тушами мамонтовой фауны и других животных), из разрезов приморских, речных и озерных террас, формировавшихся в позднем плейстоцене. Эти датировки свидетельствуют о формировании террас, росте растительности и подобных событиях, которые не могли происходить в условиях покровного оледенения.

В численных экспериментах PMIP3 показатели температурного режима холодного периода (средняя температура, продолжительность, сумма темпера-

тур) на первом этапе рассчитывались индивидуально по результатам каждой модели. Далее была выполнена билинейная пространственная интерполяция модельных данных в узлы сетки с одинаковыми географическими координатами с расстоянием  $1,75 \times 1,75^\circ$  широты и долготы. Затем в каждом узле пространственной сетки выполнялось осреднение значений по ансамблю моделей. Статистическая значимость отклонений от современных значений оценивалась по критерию Стьюдента. Оценки показали, что по всей исследуемой территории отклонения значимы на уровне 95%. На основе полученных нами результатов по ансамблю моделей была построена карта отклонений средней температуры приземного воздуха холодного периода за период со средней суточной температурой  $t < 0^\circ\text{C}$  21 тыс. л. н. от современных значений, PMIP3 по эксперименту LGM (рис.).

Таблица 1

### Модели климата, PMIP3/CMIP5, эксперимент Last Glacial Maximum

| Модель       | Организация                                                                                                                                                                           | Расстояние между узлами модельной сетки, градусы широты и долготы |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| IPSL-CM5A-LR | Институт Пьера-Симона Лапласа, Франция                                                                                                                                                | $1,89474 \times 3,75$                                             |
| GISS-E2-R    | Годдаровский институт космических исследований, Национальное управление по воздухоплаванию и исследованию космического пространства (NASA), США                                       | $2 \times 2,5$                                                    |
| GISS-E2-R    | Годдаровский институт космических исследований, Национальное управление по воздухоплаванию и исследованию космического пространства (NASA), США                                       | $2 \times 2,5$                                                    |
| MPI-ESM-P    | Институт метеорологии имени Макса Планка, Германия                                                                                                                                    | $1,865 \times 1,875$                                              |
| CNRM-CM5     | Национальный центр климатических исследований / Европейский центр исследований и подготовки научных кадров, Франция                                                                   | $1,4 \times 1,40625$                                              |
| FGOALS-g2    | Институт физики атмосферы (Пекин); Китайская академия наук, Университет Цинхуа, Китай                                                                                                 | $2,79 \times 2,8125$                                              |
| MRI-CGCM3    | Институт метеорологических исследований, Япония                                                                                                                                       | $1,12 \times 1,125$                                               |
| MIROC-ESM    | Институт исследований атмосферы и океана (Университет Токио); Национальный институт исследований окружающей среды; Агентство по науке и технологии исследований океана и суши, Япония | $2,79 \times 2,8125$                                              |
| CCSM4        | Объединенная модель климатической системы, США                                                                                                                                        | $0,94 \times 1,25$                                                |
| COSMOS-ASO   | Свободный университет Берлина; Институт метеорологии, Берлин, Германия                                                                                                                | $3,71 \times 3,75$                                                |

Независимые количественные оценки температуры приземного воздуха холодного сезона по изотопному составу сингенетических повторно-жильных льдов ( $\delta^{18}\text{O}$ ) выполнялись на основе методики, разработанной Ю.К. Васильчуком [Васильчук, 1992; Vasil'chuk, 1991].

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выполненное сравнение палеореконструкций отклонения средней температуры воздуха в холодный период ( $t < 0^\circ\text{C}$ ) от современных значений по результатам ансамбля климатических моделей (модельные палеореконструкции) и изотопного состава

ва едомных повторно-жильных льдов (изотопные палеорекострукции) в одних и тех же пунктах для периода LGM (около 21 тыс. л. н.) позволило получить следующие результаты.

На рисунке представлены итоги модельных расчетов отклонения от современных значений средней температуры приземного воздуха и суммы средней суточной температуры приземного воздуха за период со средней суточной температурой  $t < 0^{\circ}\text{C}$  21 тыс. л. н. (среднее по ансамблю 12 моделей климата). Красными точками отмечены места отбора проб для последующего определения содержания изотопа кислорода  $^{18}\text{O}$ . Очевидно, что наибольшее похолодание, по сравнению с современным климатом, отмечается в районе Скандинавии и шельфовой зоны Баренцева и Карского морей. Такое географическое распределение получено в результате того, что ледник, как предполагалось при постановке численных экспериментов PMIP3, учитывался в моделях в соответствии со сценарием, показанным в [Abe-Ouchi et al., 2015]. Однако тщательные исследования данных радиоуглеродного датирования [Hughes et al., 2016] показывают, что площадь ледника была иной, а именно существенно меньшей, чем ранее предполагалось. К подобному же выводу при-

водит анализ изотопного состава сингенетических повторно-жильных льдов ( $\delta^{18}\text{O}$ ) [Васильчук, 1992; Vasil'chuk, Vasil'chuk, 2014; Васильчук и др., 2021].

Созданные по изотопному составу подземных льдов реконструкции температуры воздуха и их сопоставление с данными моделирования климата довольно неплохо коррелируют друг с другом (табл. 2), однако в отдельных регионах наблюдаются некоторые отличия. В наибольшей мере различаются реконструкции в западном секторе Сибири: в Западной Сибири отклонения от современных среднезимних температур по модельным расчетам на  $7,9^{\circ}\text{C}$  ниже, чем по изотопным данным, также в устье р. Лены по модельным палеорекострукциям они на  $7,0^{\circ}\text{C}$  ниже, чем по изотопным. Из сравнения двух реконструкций следует, что, по мере продвижения на восток и удаления от территории предполагаемого позднеплейстоценового ледникового щита, заданного при модельных расчетах, результаты изотопной реконструкции температуры и модельных расчетов сближаются (см. табл. 2). Особенно близкие данные палеорекострукций получены для северной и центральной Якутии и арктических островов, где разница реконструкций, выполненная обоими методами, составила  $0-1,2^{\circ}\text{C}$ .

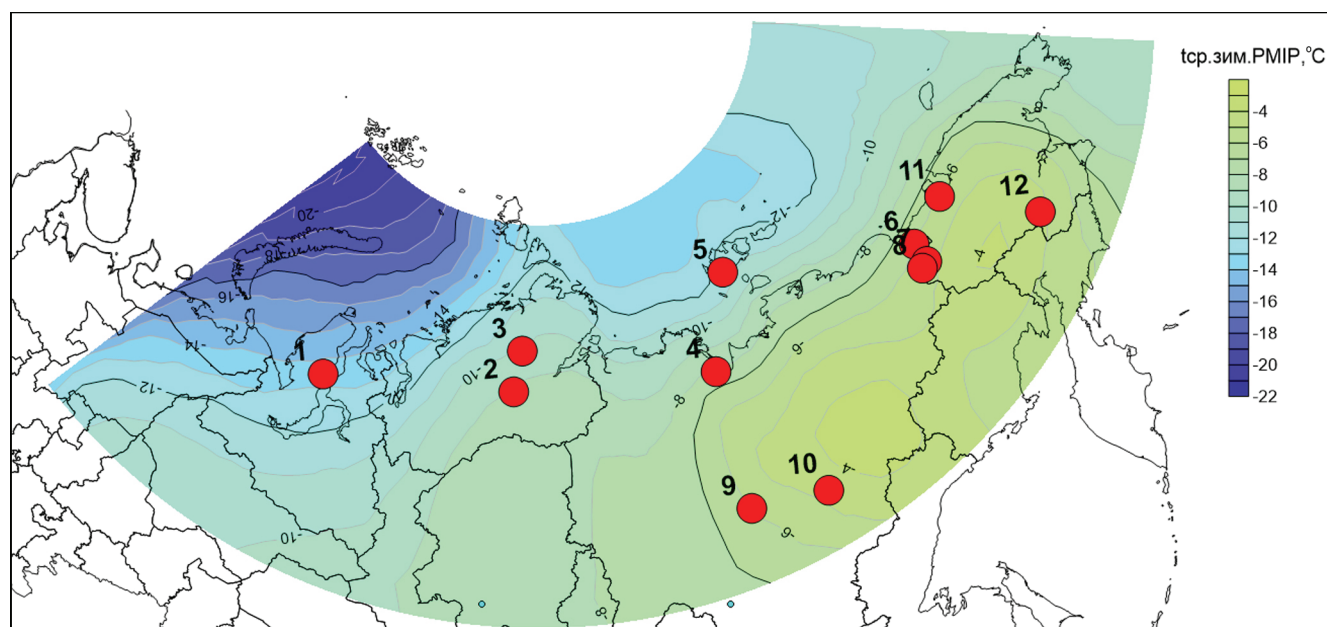


Рис. Отклонение средней температуры приземного воздуха холодного сезона 21 тыс. л. н. от современных значений по результатам PMIP3.

Шкала соответствует отклонению средней температуры приземного воздуха холодного сезона за период со средней суточной температурой  $t < 0^{\circ}\text{C}$  21 тыс. л. н. от современных значений, PMIP3 (эксперимент LGM). Точками отмечены пункты изотопных исследований позднеплейстоценовой едомы возрастом около 21 тыс. л. н. Номера рядом с точками соответствуют табл. 1

Fig. Deviation of mean air temperature for the 21 BP cold season from modern climate parameters based on the PMIP3 results. The scale corresponds to the deviation of the cold season average surface air temperature for the period with the mean daily temperature  $t < 0^{\circ}\text{C}$  for 21 kyr BP from modern values, PMIP3 (LGM experiment). Sampling locations sites for isotope studies of the Late Pleistocene Yedoma, about 21 kyr BP, are marked with dots. Numbers are in accordance with Table 1

Таблица 2

**Реконструкции отклонения средней температуры воздуха в холодный период  
от современных значений по результатам ансамбля климатических моделей  
и изотопного анализа для точек отбора проб**

| №  | Местоположение едомного массива | Географические координаты | $\Delta t$ , °C,<br>по жилам<br>18–21 тыс. л. н. | $\Delta t_{\text{РМРЗ}}$ , °C,<br>18–21 тыс. л. н. | $\Delta t_{\text{РМРЗ}} - \Delta t$ , °C, по<br>жилам<br>18–21 тыс. л. н. |
|----|---------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Пос. Сеяха                      | 70°10' N, 72°12' E        | –5,6                                             | –13,5                                              | –7,9                                                                      |
| 2  | Оз. Лабаз                       | 72°18' N, 99°40' E        | –10,0                                            | –10,0                                              | 0,0                                                                       |
| 3  | Мыс Саблера                     | 74°33' N, 100°32' E       | –4,0                                             | –10,0                                              | –6,0                                                                      |
| 4  | Мамонтова Хаята                 | 71°61' N, 129°28' E       | –1,5                                             | –8,5                                               | –7,0                                                                      |
| 5  | О-в Котельный                   | 75°26' N, 138°49' E       | –13,2                                            | –12,0                                              | 1,2                                                                       |
| 6  | Пос. Зеленый Мыс                | 69° N, 161° E             | –6,5                                             | –6,2                                               | 0,3                                                                       |
| 7  | Плахинский Яр                   | 68°40' N, 160°17' E       | –7,0                                             | –6,0                                               | 1,0                                                                       |
| 8  | Дуваный Яр                      | 68°37' N, 159°8' E        | –6,0                                             | –6,0                                               | 0,0                                                                       |
| 9  | Устье р. Тыалычима              | 64° N, 126° E             | –3,5                                             | –7,2                                               | –3,7                                                                      |
| 10 | Мамонтова гора на р. Алдан      | 63° N, 134° E             | –5,2                                             | –4,8                                               | 0,4                                                                       |
| 11 | О-в Айон                        | 69°38' N, 168°35' E       | –3,0                                             | –7,0                                               | –4,0                                                                      |
| 12 | Ледовый обрыв на р. Майн        | 64°06' N, 171°01' E       | –10,4                                            | –4,5                                               | 5,9                                                                       |

*Примечание.* Отклонение средней температуры воздуха в холодный период от современных значений по результатам ансамбля климатических моделей ( $\Delta t_{\text{РМРЗ}}$ ) и изотопного анализа повторно-жильных льдов ( $\Delta t$ , °C) для точек отбора проб из ледяных жил

### ВЫВОДЫ

Выполнено сравнение палеорекопункций отклонения средней температуры воздуха в холодный период ( $t < 0^\circ\text{C}$ ) от современных значений по результатам ансамбля климатических моделей (модельные палеорекопункции) и изотопного состава едомных повторно-жильных льдов (изотопные палеорекопункции) в одних и тех же пунктах для периода LGM (около 21 тыс. л. н.).

В результате сопоставления модельных и изотопных палеорекопункций отклонения средней температуры воздуха в холодный период (средняя суточная  $t < 0^\circ\text{C}$ ) от современных значений получены весьма обнадеживающие выводы, позволяющие говорить о том, что валидация данных в целом удалась, даже в большей мере, чем ожидалось.

Особенно близкие данные палеорекопункций получены для северной и центральной Якутии и арктических островов, где разница температур, выполненная с использованием данных моделирования и изотопных реконструкций, составила 0–1,2°C.

В наибольшей мере различаются реконструкции в западном секторе Сибири – в Западной Сибири отклонения от современных среднезимних температур по модельным расчетам на 7,9°C ниже, чем

по изотопным данным, также в устье р. Лены по модельным палеорекопункциям они на 7,0°C ниже, чем по изотопным.

Таким образом, реконструированная пространственная структура поля температуры холодного сезона LGM и его отличие от современных значений интерпретируется исследователями по-разному в зависимости от инструмента, используемого для палеорекопункций.

Определено, что наибольшие различия температурных реконструкций, полученных для LGM по разным исследованиям, отмечаются на северо-западе исследуемого региона и связаны с разной оценкой возможной площади распространения ледниковых щитов, в палеорекопункциях климатических моделей площадь оледенения предполагается значительно более обширной, чем в изотопных.

Подчеркнем, что в ряде пунктов (особенно на западе и северо-западе Российской Арктики) в большинстве моделей предполагается, что территория в позднем плейстоцене (18–21 тыс. л. н.) была покрыта льдом, а на самом деле ледника в этот период здесь не было.

Показана необходимость уточнения палеорекопункций посредством их сопоставления между собой.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-17-00126), а также в рамках работы междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды» и госзадания (номер ЦИТИС: АААА-А16-116032810086-4). Отдельно благодарим А.А. Крылова за участие в подготовке данных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев Г.В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2015. № 1. С. 11–26.
- Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Суркова Г.В., Чиждова Ю.Н. О надежности палеотемпературно-изотопных уравнений Васильчука и становлении изотопной палеогеокриологии // *Арктика и Антарктика*. 2021. № 2. С. 1–25. DOI: 10.7256/2453-8922.2021.2.36145.
- Васильчук Ю.К. Изотопно-кислородный состав подземных льдов (опыт палеогеокриологических реконструкций). В 2 т. М.: Изд. отдел. теоретических проблем РАН, МГУ, ПНИИИС, 1992. Т. 1. 420 с.; Т. 2. 264 с.
- Васильчук Ю.К., Суркова Г.В. Верификация соотношения изотопного состава повторно-жильных льдов и температуры холодного периода за последние 80 лет на севере криолитозоны России // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 11. С. 84–91.
- Влияние изменений климата и опасных природных явлений на природопользование Европейского Севера / под ред. Н.С. Касимова, Л.Н. Карлина. СПб.: РГГМУ, 2013. 124 с.
- Володин Е.М. Математическое моделирование общей циркуляции атмосферы: курс лекций. М.: ИВМ РАН, 2007. 89 с.
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1008 с.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год. М., 2020. 97 с.
- Кислов А.В., Суркова Г.В. Климатология. М.: ИНФРА-М, 2020. 324 с.
- Математическое моделирование Земной системы / под ред. Н.Г. Яковлева, М.: МАКС Пресс, 2016, 328 с.
- Эколого-географические последствия глобального потепления климата XXI века на Восточно-Европейской равнине и в Западной Сибири / под ред. А.В. Кислова, Н.С. Касимова. М.: Географический факультет МГУ, 2011. 493 с.
- Abe-Ouchi A., Saito F., Kageyam M., Braconno P., Harrison S.P., Lambeck K., Otto-Bliesner B.L., Peltier W.R., Tarasov L., Peterschmitt J.-Y., Takahashi K. Ice-sheet configuration in the CMIP5/PMIP3 Last Glacial Maximum experiments, *Geosci. Model Dev.*, 2015, vol. 8, p. 3621–3637, DOI: 10.5194/gmd-8-3621-2015.
- Braconnot P., Harrison S.P., Otto-Bliesner B., Abe-Ouchi A., Jungclaus J., Peterschmitt J.-Y. The Paleoclimate Modeling Intercomparison Project contribution to CMIP5, CLIVAR Exchanges, no. 56, vol. 16, no. 2, International CLIVAR Project Office, Southampton, United Kingdom, 2011, p. 15–19.
- Braconnot P., Harrison S.P., Kageyama M., Bartlein P.J., Masson-Delmotte V., Abe-Ouchi A., Zhao Y. Evaluation of climate models using palaeoclimatic data, *Nature Climate Change*, 2012, p. 417–424, DOI:10.1038/nclimate1456.
- Hughes A.L.C., Gyllencreutz R., Lohne Ø.S., Mangerud J., Svendsen J.I. The last Eurasian ice sheets – a chronological database and time-slice reconstruction, *DATED-1, Boreas*, 2016, vol. 45, iss. 1, p. 1–45, DOI: 10.1111/bor.12142.
- IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / edited by T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2013, 1535 p.
- Serreze M.C., Barry R.G. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis, *Global Planet Change*, 2011, vol. 77, no. 1–2, p. 85–96.
- Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A. The CMIP5 experiment design, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2012, vol. 93, p. 485–498.
- Vasil'chuk Yu., Vasil'chuk A. Spatial distribution of mean winter air temperatures in Siberian permafrost at 20–18 ka BP using oxygen isotope data, *Boreas*, 2014, vol. 43, iss. 3, p. 678–687, DOI: 10.1111/bor.12033.
- Vasil'chuk Yu.K. Reconstruction of the paleoclimate of the Late Pleistocene and Holocene of the basis of isotope studies of subsurface ice and waters of the permafrost zone, *Water Resources*, 1991, vol. 17, no. 6, p. 640–647.
- Электронные ресурсы*
- Boeke R.C., Taylor P.C. Seasonal energy exchange in sea ice retreat regions contributes to differences in projected Arctic warming, *Nature Commun.*, 2018, vol. 9, p. 5017, DOI: 10.1038/s41467-018-07061-9 (дата обращения 22.01.2022).
- PMIP3 (Paleoclimate Modelling Intercomparison Project Phase III), URL: <https://pmip3.lsce.ipsl.fr/> (дата обращения 22.01.2022).

Поступила в редакцию 05.12.2021

После доработки 16.03.2022

Принята к публикации 13.05.2022

# COMPARISON OF SIMULATED AND RECONSTRUCTED PALEOTEMPERATURES DURING THE LAST GLACIAL MAXIMUM IN NORTHERN EURASIA

G.V. Surkova<sup>1</sup>, Yu.K. Vasil'chuk<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography*

<sup>1</sup> *Department of Meteorology and Climatology, Professor, D.Sc. in Geography;  
e-mail: galina\_surkova@mail.ru*

<sup>2</sup> *Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Professor,  
Dr.Sc. in Geology and Mineralogy; e-mail: vasilch\_geo@mail.ru*

The study deals with comparative analysis of independent reconstructions of temperature regime during the cold period of the largest in the Russian Arctic Late Pleistocene glaciation (18–21 kyr BP), based on the data of isotopic analysis and the results of numerical modeling. The study used the data of numerical experiments of PMIP3 climatic models of the Earth system, and the results of temperature reconstruction based on the isotopic composition of syngenetic ice wedges ( $\delta^{18}\text{O}$ ). It is shown that in some areas there are significant differences in temperatures reconstructed from the isotope data and obtained from the modeling data. In particular, it was found that the difference in simulated and reconstructed temperatures decreases with distance from the hypothetical ice sheet, which allows concluding that the accuracy of the ice sheet location in the models is significant for the final simulation results.

In particular, different approaches in paleoclimatic studies lead to rather different estimates of the area of continental and shelf ice of the epoch. The area of glaciers and their properties are taken into account in climate models in the process of calculations. Our investigation shows that high-quality modeling definitely requires refining the paleoreconstructions based on proxy climate data.

**Keywords:** Late Pleistocene glaciation, air temperature, cold season, Arctic, isotopic and model reconstructions

**Acknowledgements.** The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 19-17-00126) and carried out under the MSU Interdisciplinary Scientific and Educational School "Future of the Planet and Global Environment Changes" and the state assignment (CITIS number: AAAA-A16-116032810086-4). Special thanks to A.A. Krylov for his assistance in data pre-processing.

## REFERENCES

- Abe-Ouchi A., Saito F., Kageyam M., Braconno P., Harrison S.P., Lambeck K., Otto-Bliesner B.L., Peltier W.R., Tarasov L., Peterschmitt J.-Y., Takahashi K. Ice-sheet configuration in the CMIP5/PMIP3 Last Glacial Maximum experiments, *Geosci. Model Dev.*, 2015, vol. 8, p. 3621–3637, DOI: 10.5194/gmd-8-3621-2015.
- Alekseev G.V. Projavlenie i usilenie global'nogo potepelenija v Arktike [Development and amplification of global warming in the Arctic], *Fundamental'naja i prikladnaja klimatologija*, 2015, no. 1, p. 11–26. (In Russian)
- Braconnot P., Harrison S.P., Otto-Bliesner B., Abe-Ouchi A., Jungclaus J., Peterschmitt J.-Y. The Paleoclimate Modeling Intercomparison Project contribution to CMIP5, *CLIVAR Exchanges*, no. 56, vol. 16, no. 2, International CLIVAR Project Office, Southampton, United Kingdom, 2011, p. 15–19.
- Braconnot P., Harrison S.P., Kageyama M., Bartlein P.J., Masson-Delmotte V., Abe-Ouchi A., Zhao Y. Evaluation of climate models using palaeoclimatic data, *Nature Climate Change*, 2012, vol. 2, no. 6, p. 417–424, DOI: 10.1038/nclimate1456.
- Doklad ob osobennostjakh klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2019 god [A report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2019], Moscow, 2020, 97 p. (In Russian)
- Ekologo-geograficheskie posledstvija global'nogo potepelenija klimata 21 veka na Vostochno-Evropejskoj ravnine i v Zapadnoj Sibiri [Ecological and geographical consequences of global warming of the 21st century on the East European Plain and in Western Siberia], A.V. Kislov, N.S. Kasimov (eds.), Moscow, Moscow State University, Faculty of Geography Publ., 2011, 493 p. (In Russian)
- Hughes A.L.C., Gyllencreutz R., Lohne Ø.S., Mangerud J., Svendsen J.I. The last Eurasian ice sheets – a chronological database and time-slice reconstruction, *DATED-1, Boreas*, 2016, vol. 45, iss. 1, p. 1–45, DOI: 10.1111/bor.12142.
- IPCC (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / edited by T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2013, 1535 p.
- Kislov A.V., Surkova G.V. *Klimatologija* [Climatology], Moscow, INFRA-M Publ., 2020, 324 p. (In Russian)
- Matematicheskoe modelirovanie Zemnoj sistemy [Mathematical modelling of the Earth system], N.G. Jakovlev (ed.), Moscow, MAKS Press, 2016, 328 p.
- Serreze M.C., Barry R.G. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis, *Global Planet Change*, 2011, vol. 77, no. 1–2, p. 85–96.
- Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A. The CMIP5 experiment design, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2012, vol. 93, p. 485–498.

- Vasil'chuk Yu., Vasil'chuk A. Spatial distribution of mean winter air temperatures in Siberian permafrost at 20–18 ka BP using oxygen isotope data, *Boreas*, 2014, vol. 43, iss. 3, p. 678–687, DOI: 10.1111/bor.12033.
- Vasil'chuk A.C., Budantseva N.A., Surkova G.V., Chizhova Ju.N. O nadezhnosti paleotemperaturno-izotopnykh uravnenij Vasil'chuka i stanovlenii izotopnoj paleogeokriologii [On the reliability of the Vasil'chuk's paleotemperature-isotopic equations and the establishment of isotopic paleogeocryology], *Arktika i Antarktika*, 2021, no. 2, p. 1–25, DOI: 10.7256/2453-8922.2021.2.36145. (In Russian)
- Vasil'chuk Yu.K. *Izotopno-kislородnyj sostav podzemnykh l'dov* (opyt paleogeokriologicheskikh rekonstrukcij) [Oxygen isotope composition of ground ice (experience of paleogeocryological reconstructions)], Moscow, Izd. otel teoreticheskikh problem RAN, MGU, PNIIS, 1992, vol. 1, 420 p.; vol. 2, 264 p. (In Russian)
- Vasil'chuk Yu.K. Reconstruction of the paleoclimate of the Late Pleistocene and Holocene of the basis of isotope studies of subsurface ice and waters of the permafrost zone, *Water Resources*, 1991, vol. 17, no. 6, p. 640–647.
- Vasil'chuk Yu.K., Surkova G.V. Verification of the Relationship between the Isotopic Composition of Ice Wedges and Cold-season Temperature over the Recent 80 Years in the Northern Permafrost Zone of Russia, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2020, vol. 45, no. 11, p. 791–796.
- Vlijanie izmenenij klimata i opasnykh prirodnykh javlenij na prirodopol'zovanie Evropejskogo Severa [Impact of climate change and natural hazards on the use of natural resources in the European North], N.S. Kasimov, L.N. Karlin (eds.), Saint Petersburg, RGGMU Publ., 2013, 124 p. (In Russian)
- Volodin E.M. *Matematicheskoe modelirovanie obshhej cirkuljacii atmosfery: Kurs lekcij* [Mathematical modelling of the general atmosphere circulation], Moscow, IVM RAN, 2007, 89 p. (In Russian)
- Vtoroj ocenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmenenijah klimata i ih posledstvijah na territorii Rossijskoj Federacii* [Second Assessment Report of Roshydromet on Climate Changes and Their Consequences on the Territory of the Russian Federation], Moscow, Rosgidromet Publ., 2014, 1008 p. (In Russian)
- Web sources*
- Boeke R.C., Taylor P.C. Seasonal energy exchange in sea ice retreat regions contributes to differences in projected Arctic warming, *Nature Commun.*, 2018, vol. 9, 5017, DOI: 10.1038/s41467-018-07061-9 (access date 22.01.2022).
- PMIP3 (Paleoclimate Modelling Intercomparison Project Phase III), URL: <https://pmip3.lscce.ipsl.fr/> (access date 22.01.2022).

Received 05.12.2021

Revised 16.03.2022

Accepted 13.05.2022