

ОЛЕДЕНЕНИЕ ЗАПАДНОГО СКЛОНА ВЕРХОЯНСКОГО ХРЕБТА ВО ВРЕМЯ LGM: ВОПРОСЫ ХРОНОЛОГИИ И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ КОСМОГЕННОГО ДАТИРОВАНИЯ

М.С. Лукьянычева¹, А.Н. Васильева¹, В.М. Лыткин², Р.Н. Курбанов³

¹Институт географии РАН, Москва, Россия;

²Институт мерзлотоведения имени П. И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

³МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Аннотация. Изучение хронологии и масштабов четвертичных оледенений Северо-Восточной Сибири играет ключевую роль в понимании динамики климатических изменений. Несмотря на свою значимость, Верхоянский хребет долгое время оставался малоизученным из-за удаленности и ограниченного применения современных методов датирования. В рамках данного исследования впервые получена новая ледниковая хронология западного склона Верхоянского хребта с использованием метода космогенного ¹⁰Be. Полученные данные свидетельствуют о значительном оледенении горной области Верхоянского хребта в период последнего ледникового максимума (LGM), с продвижением ледников более чем на 100 км от осевой части хребта. Эти результаты пересматривают более ранние гипотезы об отсутствии ледникового покрова в данном регионе во время LGM и указывают на постепенное сокращение площади оледенения в позднем плейстоцене.

Ключевые слова: плейстоцен, четвертичные оледенения, Северо-Восток Сибири, морены, ¹⁰Be

GLACIATION OF THE WESTERN SLOPE OF THE VERKHOYANSK RIDGE DURING THE LGM: CHRONOLOGICAL ISSUES AND INITIAL COSMOGENIC DATING RESULTS

M.S. Lukyanycheva¹, A.N. Vasilieva¹, V.M. Lytkin², R.N. Kurbanov³

¹Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

²Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

³Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Abstract. Understanding the chronology and extent of Quaternary glaciations in northeastern Siberia is crucial for reconstructing past climate dynamics. However, the Verkhoyansk Range has remained poorly studied due to its remote location and limited application of modern dating techniques. This study presents the first glacial chronology for the western slope of the Verkhoyansk Range, established using cosmogenic ¹⁰Be dating. The results reveal extensive glaciation during the Last Glacial Maximum (LGM), with glaciers advancing over 100 km from the ridge axis. These findings challenge previous assumptions about the absence of ice cover in this region during the LGM and suggest a gradual decline in glaciation throughout the Late Pleistocene.

Keywords: Pleistocene, Quaternary glaciations, northeastern Siberia, moraines, ¹⁰Be

Введение. Изучение процессов смены оледенений и межледниковий играет ключевую роль в понимании климатической системы Земли и факторов, влияющих на ее динамику. Несмотря на значительный прогресс в этой области, ряд фундаментальных вопросов, связанных с причинами и особенностями климатических изменений, остается открытым. Одной из таких нерешенных проблем является определение масштабов и хронологий четвертичных оледенений в Северо-Восточной Сибири, включая Верхоянский хребет — труднодоступный и малоизученный регион. Хронология и масштабы позднеледниковой оледенения этого региона обсуждаются на протяжении

нескольких десятилетий [2, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 12, 13, 14 и мн.др.]. Основные исследования проводились в рамках геологических и геоморфологических изысканий прошлого века, в результате которых были выделены следы одного оледенения в среднем неоплейстоцене (самаровское) и двух в позднем неоплейстоцене (зырянское и сартанское). Некоторые ученые также предполагают наличие тазовского оледенения в среднем неоплейстоцене, однако убедительных доказательств этому пока нет. В целом, данные о четвертичных оледенениях Северо-Восточной Азии остаются фрагментарными, а стратиграфия четвертичных отложений региона недостаточно детально разработана. Это объясняется не только обширностью территории и сложностью ее геоморфологического строения, но и сложностью проведения исследований в удаленных районах. Таким образом, наблюдается острая необходимость новых исследований с применением современных методов.

На западном склоне Верхоянского хребта в 1960–1970 гг. были получены первые радиоуглеродные даты для Верхоянского хребта [9]. Их анализ показал, что наиболее древними являются самаровские ледниковые отложения, выходящие за рамки радиоуглеродного датирования. Согласно другим работам, в центральной части Верхоянских гор в районе долин рек Дянушка, Тумара и Келе (рис. 1) сохранилось пять разновозрастных конечных морен [20, 21]. Датирование методом инфракрасно-стимулированной люминесценции (ИКСЛ) флювиогляциальных отложений позволило определить возраст самой древней морены на западном склоне Верхоянского хребта — 135–141 тыс. л. [21].

Таким образом, реконструкция ледниковой динамики западного склона Верхоянского хребта предоставляет важные сведения о палеогеографических условиях осадконакопления в бассейне реки Лены. В этом районе распространены многочисленные горные хребты средних и низких высот, а левые притоки р. Лены прорезают ледниковые и аллювиальные отложения на десятки метров, создавая уникальные условия для изучения ледниковой истории региона. Ограниченный объем данных о ледниковой истории Верхоянского хребта во многом обусловлен его удаленностью и недостатком точных возрастных оценок оледенений. В целях восполнения этого пробела были проведены полевые исследования, в ходе которых отобраны образцы для датирования методом космогенного ^{10}Be в долине реки Ундюлюнг на западном склоне Верхоянского хребта (рис.1).

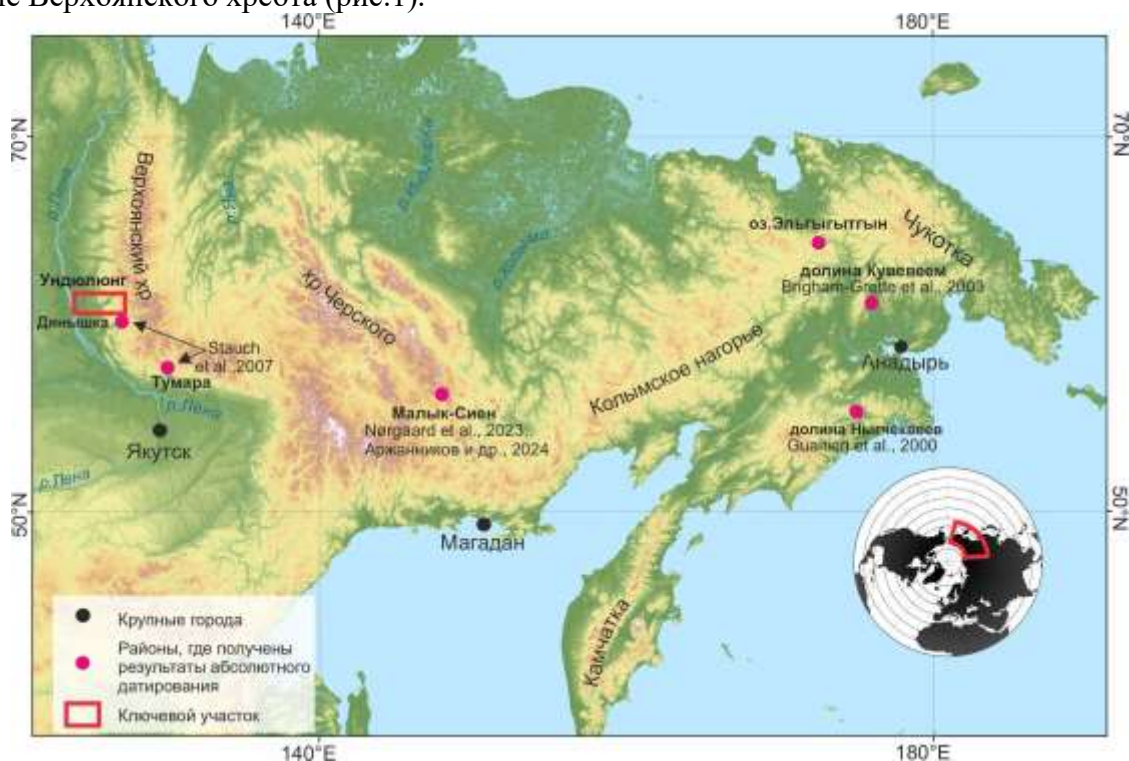


Рис. 1. Обзорная карта Северо-Восточной Сибири. Район исследования обозначен красным прямоугольником, а места проведения других исследований ледниковой хронологии, упомянутых в тексте, помечены пурпурными точками.

Район исследования. Верхоянский хребет — один из ключевых регионов для изучения масштабов и хронологии четвертичных оледенений Северо-Восточной Сибири. Этот горный массив, являясь одним из крупнейших в Северо-Восточной Азии, формирует дугообразную структуру, выгнутую на юго-запад, с шириной от 100 до 250 км и протяженностью около 1200 км по правобережью среднего и нижнего течения реки Лена, начиная от ее дельты и вплоть до долины реки Томпо (бассейн Алдана).

Рельеф Верхоянской горной системы отличается высокой расчлененностью и включает множество отдельных хребтов. В центральной части абсолютные отметки достигают 2500–2900 м. Западные склоны, ограниченные продольными разломами, характеризуются более низкими высотами — 400–500 м, тогда как на восточных склонах они варьируются в пределах 800–1000 м. В целом, регион имеет преимущественно среднегорный рельеф. Сочетание значительных высот, сложного рельефа и специфических климатических условий создало благоприятные предпосылки для горных оледенений в четвертичном периоде [2].

Климат Верхоянского хребта отличается высокой континентальностью, выраженной в засушливости и продолжительных зимних периодах. Холодный сезон в горах длится около 8–9 месяцев, а снежный покров достигает 50–60 см. Средние январские температуры на высотах 300–400 м могут опускаться до -39°C . [3, 21].

Ключевой участок исследования располагается на западном склоне Верхоянского хребта в районе долины р. Ундюлюнг (рис. 1). Эта река является правым притоком р. Лены и берет свое начало на хребте Орулган, который входит в состав Верхоянского хребта.

Материалы и методы. Перед проведением полевых исследований долины реки Ундюлюнг были проанализированы космические снимки, что позволило выделить моренные комплексы и определить ключевые участки для дальнейшего изучения. В ходе экспедиционных работ из ледниковых отложений и форм рельефа отобраны образцы для абсолютного датирования методом наземных космогенных радионуклидов (НКР). Данный метод основан на выявлении редких радионуклидов, которые формируются при взаимодействии космического излучения с минералами горных пород. Он широко применяется в палеогляциологии, позволяя определить время экспозиции отложений, ранее находившихся под ледниковым покровом. Анализ концентрации радионуклидов в поверхностном слое горных пород дает возможность установить, сколько времени прошло с момента их выхода на поверхность и начала воздействия космического излучения. Этот метод эффективно применяется для датирования ледниковых валунов, моренных комплексов, поверхностей ледниковой экзарации и других форм рельефа [17].

В рамках исследования были отобраны 12 образцов коренных пород и валунов из кварцевых песчаников, имеющих следы ледниковой обработки. Для каждого образца зафиксированы топографические и геологические характеристики, необходимые для дальнейших расчетов. Основной целью лабораторной обработки было выделение чистого кварца, содержащего целевой радионуклид. Пробы прошли механическую и химическую подготовку в совместной лаборатории МГУ им. М.В. Ломоносова и Института географии РАН, а также в лаборатории космогенного датирования Орхусского университета (Дания). В результате были определены концентрации *in-situ* ^{10}Be в каждом из 12 образцов и проведены расчеты их возраста.

Результаты и их обсуждения. Аккумулятивные формы рельефа в днище долины реки Ундюлюнг встречаются повсеместно и представлены полого-наклонными, холмистыми, а местами грядовыми образованиями. Они имеют различное происхождение, включая ледниковое, флювиогляциальное, аллювиальное, ледниково-озерное и пролювиальное. Ледниковые отложения представлены комплексами морен, сформировавшихся в ходе различных стадий отступления ледников. Геоморфологическая карта, построенная на основе анализа территории, демонстрирует ключевые особенности рельефа (рис. 2А).

В исследуемой долине выделено пять ледниковых комплексов, различающихся по протяженности, возрасту и характеру четвертичных отложений (рис. 2А). Конечные морены, сформированные на предгорной равнине (комплексы III–V) представляют собой классические

предгорные формы рельефа, покрыты мощными пачками песчаных и лессовых отложений эолового и озерного происхождения. В горной части региона моренные комплексы I–II обладают более выраженной морфологией, с четкими следами морозной сортировки и пучения. Ледниковые валуны и коренные породы, подходящие для космогенного датирования, были обнаружены только в пределах моренного комплекса II. Методом космогенного датирования было получено 12 дат (в диапазоне 26–17 тыс. л.н.) для ледниковых валунов и коренных пород. Данные указывают на начало дегляциации в горной области около 26–20 тыс. л.н. (Участок 1, рис. 2Б), при этом она продолжалась до 17 тыс. л. н. (Участки 2–3, рис. 2Б).

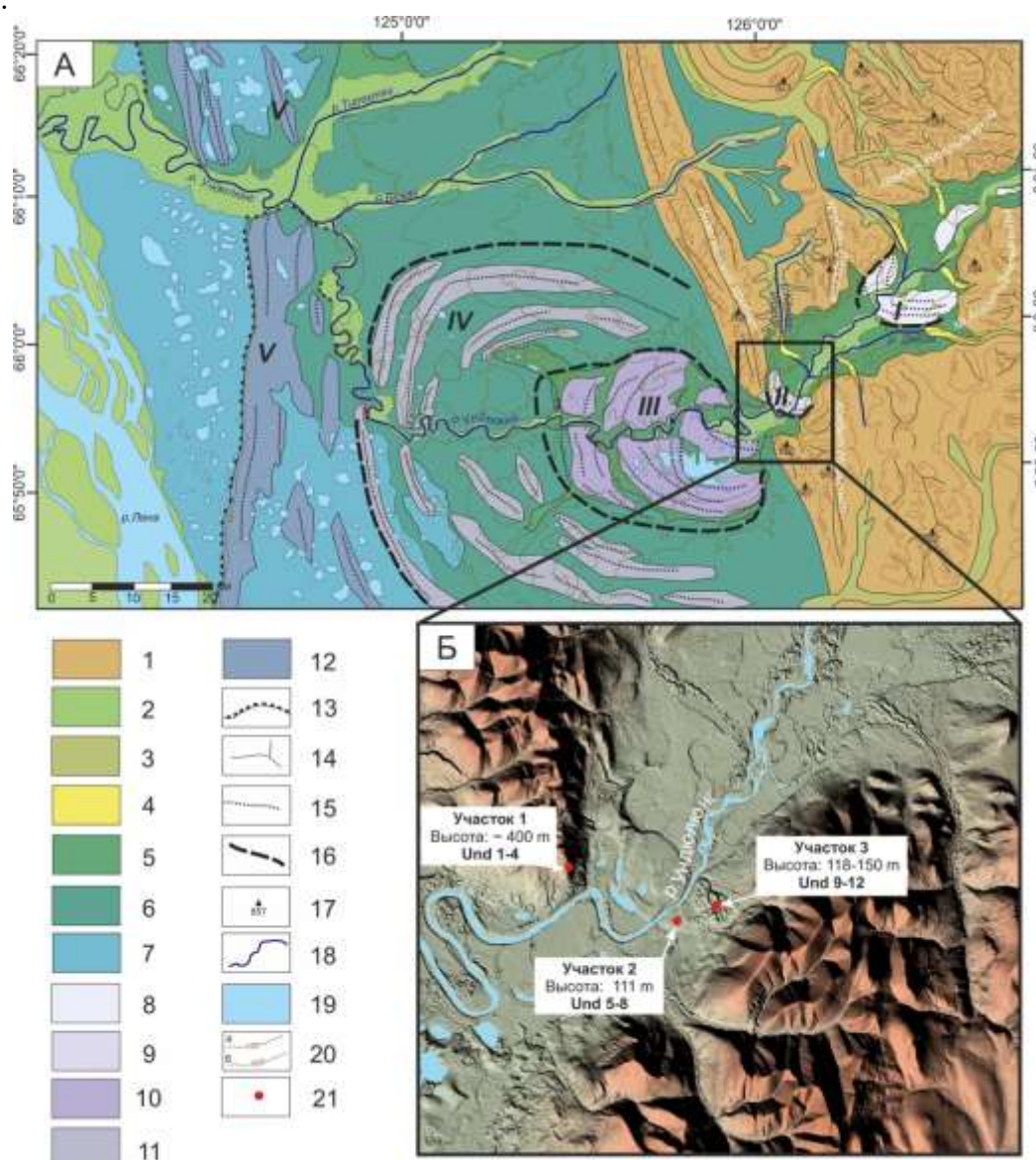


Рис. 2. А. Геоморфологическая карта долины р. Ундюлюнг. Б. Ключевой объект исследования с расположением участков 1, 2 и 3.

Условные обозначения: *Структурно-денудационный рельеф*: 1 – Склоны и вершины низкорного рельефа, выработанные на субстрате сложнодислоцированных терригенных пород палеозой-мезозойского возраста. *Аккумулятивный рельеф*: 2 – поверхности аллювиальных равнин и террас; 3 – поверхности аллювиально-пролювиальных предгорных равнин и речных долин; 4 – пролювиальные конусы выноса; 5 – флювиогляциальные пологонаклонные поверхности; 6 – полигенетическая денудационно-аккумулятивная холмисто-западинная поверхность; 7 – поверхности ледниково-озерных низменностей. Конечные морены разновозрастных комплексов: 8 – I-го; 9 – II-го; 10 – III-го; 11 – IV-го; 12 –

V-го. *Формы и элементы рельефа*: 13 – денудационные уступы; 14 – линии гребней хребтов; 15 – оси конечных морен; 16 – границы максимальных продвижений ледников в пределах одного комплекса. *Прочие обозначения*: 17 – отметки горных вершин; 18 – речная сеть; 19 – водоемы и крупные реки; 20 – горизонталы: а – в пределах предгорной равнины и днищ речных долин (с интервалом высот 50 м), б – в пределах горной области (с интервалом высот 250 м); 21 – положение исследуемых объектов и разрезов.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что дегляциация в регионе происходила в период последнего ледникового максимума (LGM). Оледенение охватывало горные районы, а его протяженность от осевой части Верхоянского хребта могла достигать 100 км. Возможно, аналогичные ледники существовали и в других долинах, прорезающих западный склон Верхоянского хребта во время LGM. Геоморфологическое картирование, в сочетании с опубликованными материалами [8, 9, 15, 20], подтверждает наличие конечных морен в горных долинах Дянушка, Тумара, Келе, Бегиджан и Собополь. Однако возраст этих морен остается предметом дискуссий. Согласно [20, 21], Верхоянский хребет был практически свободен ото льда во время LGM, а последнее крупное ледниковое наступление, предположительно, произошло более 50 тыс. л.н. В то же время более ранние радиоуглеродные исследования [8, 9, 10] озерно-аллювиальных отложений, перекрывающих морены (включая древесно-торфяные материалы), указывают на то, что оледенение на западном склоне Верхоянского хребта происходило не только во время LGM, но и в голоцене.

Наши результаты, полученные в долине реки Ундюлюнг, в целом согласуются с данными из других регионов Северо-Восточной Сибири, где зафиксированы следы оледенения в период LGM. Недавние исследования, основанные на анализе возраста ^{10}Be в ледниковых валунах хребта Черского (долина Малый-Сиен, рис. 1), показали, что формирование самой молодой морены происходило в период 18–13 тыс. л. н., уже после глобального LGM [1, 19]. В Корякском нагорье, согласно распределению возрастов ^{36}Cl , продвижение ледников в долине Ныгчеквеем (рис.1) происходило в промежутке между 21.6 и 11.6 тыс. л.н., а в долине Находка — в диапазоне 16.6–14.7 тыс. л.н.[18]. На Чукотке, в долине реки Кувеем (рис.1), наиболее молодые морены, датированные методом ^{36}Cl , сформировались в период между 23.6 и 16.2 тыс. л.н. [16].

Выводы.

Мы представляем новые данные, свидетельствующие о значительном оледенении Верхоянского хребта в период LGM. В ходе исследования были получены двенадцать дат экспозиции ^{10}Be из ледниковых валунов и коренных пород на западном склоне Верхоянского хребта в долине р. Ундюлюнг. Установлено, что во время LGM ледник простирался более чем на 100 км от центральной части хребта до его фронтальной зоны. Наша хронология показывает, что начало дегляциации ледникового покрова происходило на высоте около 300 м над уровнем дна долины в период между 25 и 17 тыс. л.н. Полученные данные пересматривают прежние гипотезы, согласно которым западные склоны Верхоянского хребта оставались преимущественно свободными ото льда на протяжении последних 50 тыс. л. [20, 21]. Наши результаты подтверждают тенденцию к сокращению ледникового покрова в Северо-Восточной Сибири в течение позднего плейстоцена, что, возможно, отражает усиление аридизации этого региона с течением времени.

Благодарность. Работа выполнена в рамках гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2024-554 от 24.04.2024).

Литература

1. Аржанников С. Г., Аржанникова А. В., Чеботарев А. А., Торговкин Н. В., Семиколенных Д. В., Лукьянычева М. С., Курбанов Р. Н. Опыт применения метода датирования по космогенному ^{10}Be для оценки возраста и масштабов плейстоценового

- оледенения северо-восточной Сибири (на примере ледниковых комплексов хр. Черского) //Геоморфология и палеогеография. 2024. Т. 55. №. 3. С. 53-72.
2. Баранова Ю. П., Бискэ С. Ф. Северо-Восток СССР. Наука, 1964.
 3. Васильев И. С., Торговкин Я. И. Пространственное распределение осадков в Якутии //Метеорология и гидрология. 2002. №. 6. С. 23-32.
 4. Воскресенский С. С., Чанышева, М. Н., Воскресенский, И. С., Караевская, И. А. Плейстоценовые оледенения бассейна Колымы //Плейстоценовые оледенения Востока Азии. Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР. 1984. С. 57-65.
 5. Гольдфарб Ю. И. Стратиграфия четвертичных отложений верховьев Колымы //Пробл. изуч. четвертич. периода. М.: Наука. 1972. С. 220-228.
 6. Глушкова О. Ю. Морфология и палеогеография позднеплейстоценовых оледенений Северо-Востока СССР //Плейстоценовые оледенения востока Азии. Магадан: свкнии двнц ан сср. 1984. С. 28-42.
 7. Заморуев В. В. Проблемы изучения четвертичного оледенения гор востока СССР //ВСЕГЕИ. 1978. Т. 297. С. 100.
 8. Кинд Н. В., Колпаков В. В., Сулержицкий Л. Д. О возрасте оледенений Верхоянья //Изв. АН СССР, сер. геол. 1971. №. 10. С. 135-144.
 9. Кинд Н. В. Оледенения Верхоянских гор и положение их в абсолютной геохронологической шкале верхнего антропогена Сибири //Палеогеография и перигляциальные явления плейстоцена. М.: Наука. 1975. С. 124-132.
 10. Колпаков В. В. Об ископаемых пустынях нижнего течения р. Лены // Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода. 1970. №. 37. С. 75-82.
 11. Онищенко Б. А. Новые данные к проблеме четвертичного оледенения Северо-Востока СССР (на примере горной системы Черского) //Основные проблемы изучения четвертичного периода. М.: Наука. 1965. С. 123-130.
 12. Сакс В.Н. Четвертичный период в Советской Арктике. – Труды НИИГА, 1953. – 627 с.
 13. Чанышева М.Н., Бредихин А.В. О границе плейстоценовых оледенений в бассейне верхнего и среднего течения р. Колымы. //Геоморфология. 1981. №. 3. С. 97-103.
 14. Хворостова З.М. Четвертичное оледенение горной части бассейнов рек Индигирки и Колымы//Основные проблемы изучения четвертичного периода. //Наука. 1965. С. 272-278.
 15. Barr I. D., Clark C. D. Late Quaternary glaciations in Far NE Russia; combining moraines, topography and chronology to assess regional and global glaciation synchrony //Quaternary Science Reviews. 2012. Vol. 53. P. 72-87.
 16. Brigham-Grette J., Gualtieri L. M., Glushkova O.Y., Hamilton T.D., Mostoller D., and Kotov A. Chlorine-36 and 14C chronology support a limited last glacial maximum across central Chukotka, northeastern Siberia, and no Beringian ice sheet //Quaternary Research. – 2003. – Vol. 59. – No. 3. – P. 386-398.
 17. Gosse J. C., Phillips F. M. Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application //Quaternary Science Reviews. – 2001. – Vol. 20. – No. 14. – P. 1475-1560.
 18. Gualtieri, L., Glushkova, O. Y., Brigham-Grette, J. Evidence for restricted ice extent during the last glacial maximum in the Koryak Mountains of Chukotka, far eastern Russia //Geological Society of America Bulletin. – 2000. – Vol. 112. – No. 7. – P. 1106-1118.
 19. Nørgaard J., Margold M., Jansen J. D., Kurbanov R., Szuman I., Andersen J. L., ... Knudsen M. Absence of Large-Scale Ice Masses in Central Northeast Siberia During the Late Pleistocene //Geophysical Research Letters. – 2023. – T. 50. – №. 10. – С. e2023GL103594.
 20. Stauch G., Lehmkuhl F. Quaternary glaciations in the Verkhoyansk Mountains, northeast Siberia //Quaternary Research. – 2010. – Vol. 74. – No. 1. – P. 145-155.
 21. Stauch G., Lehmkuhl F., Frechen M. Luminescence chronology from the Verkhoyansk Mountains (north-eastern Siberia) //Quaternary Geochronology. – 2007. – Vol. 2. – No. 1-4. – P. 255-259.