

УДК 551.89

## ОЛЕДЕНЕНИЕ ЗАПАДНОГО ПРЕДГОРЬЯ ВЕРХОЯНСКОГО ХРЕБТА ВО ВРЕМЯ ПОСЛЕДНЕГО ЛЕДНИКОВОГО МАКСИМУМА (LGM)

© 2026 г. М. С. Лукьянычева<sup>1,\*</sup>, А. Н. Васильева<sup>1,2</sup>, В. М. Лыткин<sup>2</sup>, Р. Н. Курбанов<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт мерзлотоведения СО РАН, Якутск, Россия

<sup>3</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\*e-mail: mashluk95@gmail.com

Поступила в редакцию 11.07.2025 г.

После доработки 14.09.2025 г.

Принята к публикации 29.12.2025 г.

Рассматривается хронология и масштабы четвертичных оледенений в Северо-Восточной Сибири на примере Верхоянского хребта — одного из крупнейших и слабоизученных горных массивов региона. Анализируются существующие геоморфологические и геологические данные, а также результаты космогенного датирования по изотопу <sup>10</sup>Be, примененное к ледниковым отложениям и формам рельефа в долине р. Ундюлюнг. Полученные результаты на основе 12 экспонированных датировок по содержанию in-situ <sup>10</sup>Be в ледниковых валунах и коренных породах свидетельствуют о наличии крупного горно-долинного оледенения в позднем плейстоцене. Ледники заполняли долины и простирались более чем на 100 км к западу от центральной оси хребта во время последнего ледникового максимума (LGM) — около 28–17 тыс. лет назад. Оледенение в этот период, вероятно, покрывало значительные территории западных склонов хребта. Сравнение с региональными палеоклиматическими и геохронологическими данными свидетельствует о синхронности позднеледниковых стадий дегляциации по всему северо-востоку Сибири и подчеркивает важность <sup>10</sup>Be-датировок для реконструкции эволюции оледенения. Полученные результаты поддерживают гипотезу о поэтапном сокращении объемов ледников в северо-восточной Сибири в позднем плейстоцене. Работа акцентирует внимание на необходимости дальнейшего комплексного изучения палеоинформации, полученной на Верхоянском хребте для разрешения существующих дискуссионных проблем, касающихся истории оледенений региона.

**Ключевые слова:** морены, горно-долинные ледники, космогенное датирование, <sup>10</sup>Be, плейстоцен, палеоклимат, Якутия

DOI: 10.7868/S2412376526010104

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение чередования оледенений и межледниковий имеет ключевое значение для понимания климатической системы Земли и факторов, определяющих её динамику. Несмотря на достигнутый в последние десятилетия прогресс в этом направлении, многие фундаментальные вопросы, касающиеся причин и особенностей климатических изменений, остаются нерешёнными. Одна из таких проблем — определение масштабов и хронологии четвертичных оледенений в Северо-Восточной Сибири, в том числе

в пределах Верхоянского хребта — труднодоступного и слабоизученного региона. Хронология и протяжённость плейстоценовых оледенений в этом районе остаются предметом научной дискуссии на протяжении многих десятилетий (Баранова, Бискэ, 1964; Кинд и др., 1971; Glushkova, 2001; Stauch, Lehmkuhl, 2010 и др.).

Основные исследования в области четвертичной геологии и геоморфологии Северо-Восточной Сибири были проведены в прошлом веке. В их ходе идентифицированы следы одного оледенения в среднем плейстоцене (самаров-

ское) и двух в позднем плейстоцене (зырянское и сарганское) (Баранова, Бискэ, 1964). Некоторые исследователи также выдвигали гипотезу о существовании оледенения в среднем плейстоцене (тазовское оледенение) (Колпаков, 1983), однако достоверные подтверждения этой версии до настоящего времени отсутствуют.

В целом данные о четвертичных оледенениях Северо-Восточной Азии остаются фрагментарными, а стратиграфия четвертичных отложений региона недостаточно детально разработана. Серьёзные неопределённости сохраняются и в оценке масштабов и хронологии прошлых оледенений (Barr, Clark, 2012). Это в первую очередь связано с ограниченным применением современных методов датирования: они использовались лишь на отдельных участках, что делает пространственно-временные оценки распространения ледников крайне спорадичными и затрудняет надёжную реконструкцию ледниковой истории региона. Такая ситуация обусловлена не только большой площадью территории и сложностью её геоморфологического строения, но и значительными трудностями, связанными с проведением полевых исследований в удалённых и труднодоступных районах.

Древнейшие ледниковые формы рельефа с надёжными хронологическими ограничениями на территории Северо-Восточной Сибири датируются морской изотопной стадией (далее — МИС) 6. Возраст этих моренных комплексов был определён с использованием инфракрасно-стимулированной люминесценции (далее — ИКСЛ) флювиогляциальных отложений на западном склоне Верхоянского хребта (Stauch, Lehmkuhl, 2010) и методом космогенного датирования по  $^{10}\text{Be}$  в районе хребта Черского (Nørgaard et al., 2023; Аржанников и др., 2024). Для ледниковых форм рельефа позднеплейстоценового возраста доступны более количественно обоснованные возрастные оценки. На Чукотке и в Корякском нагорье хронология оледенений, относящихся к МИС 4 и последнему ледниковому максимуму (далее — LGM), была установлена с использованием космогенного датирования по  $^{36}\text{Cl}$  (Gualtieri et al., 2000; Glushkova, 2001; Brigham-Grette et al., 2003). В центральной части Северо-Восточной Сибири, в хребте Черского, моренные комплексы, датированные по космогенному изотопу  $^{10}\text{Be}$ , свидетельствуют о наличии значительных ледников в период МИС 3 и LGM/МИС 2 (Аржанников и др., 2024).

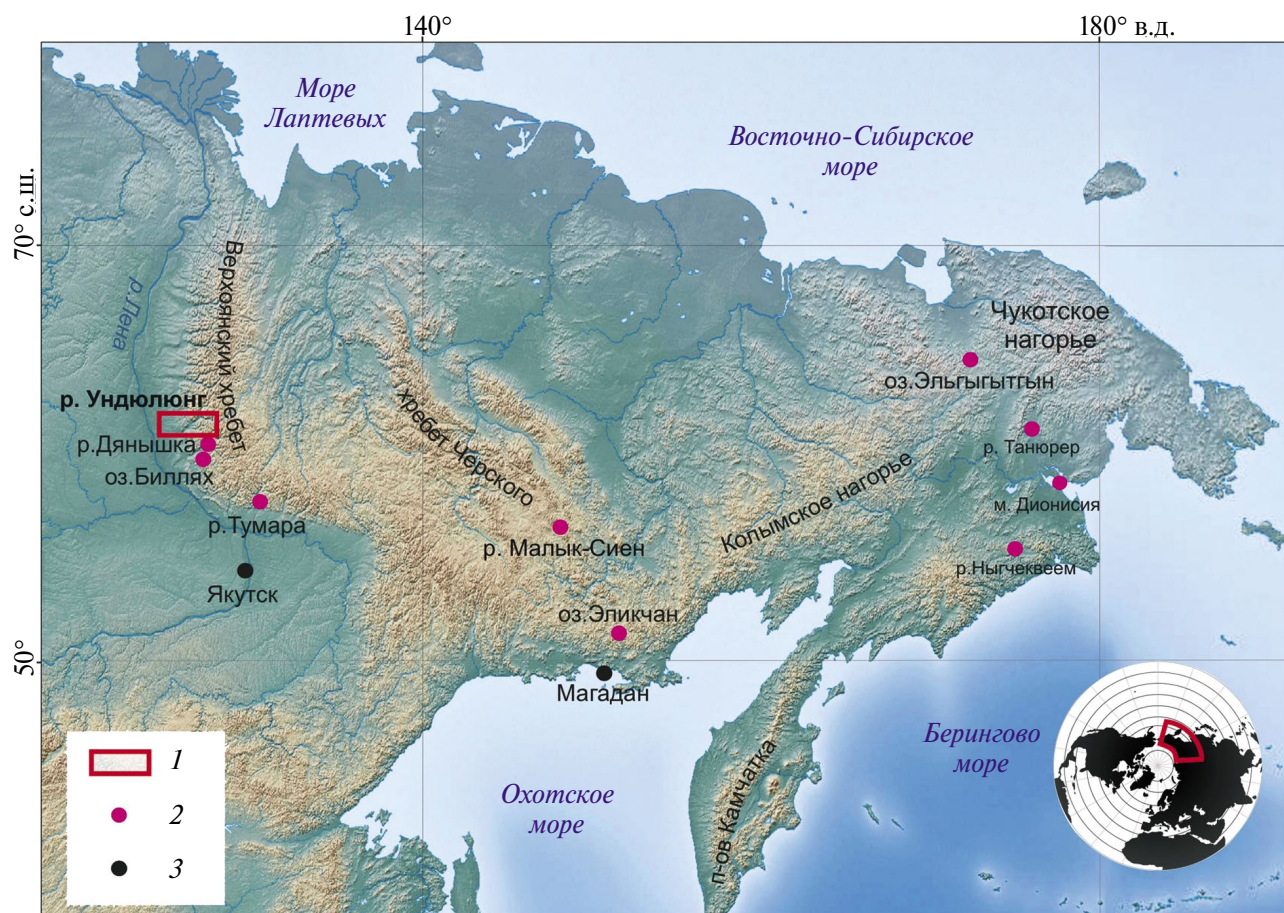
На Верхоянском хребте исследования ледниковых отложений начались ещё в 1960–1970-х г., когда были получены первые радиоуглеродные датировки (Кинд и др., 1971). Согласно результатам датирования озёрно-аллювиальных отложений, залегающих выше морен, позднеплейстоценовые ледниковые наступания происходили до 40 тыс. лет назад, с двумя основными фазами: 33–30 и 29–15 тыс. лет назад (Кинд и др., 1971). Эти данные указывают на то, что во время LGM ледники были ограничены внутренними горными районами. Более поздние исследования в начале 2000-х гг. включали применение метода ИКСЛ для датирования переслаивающихся эоловых и флювиальных отложений в пяти ледниковых комплексах на западных склонах Верхоянского хребта. Полученные оценки возраста этих комплексов варьируют от ~140 до ~50 тыс. лет (Stauch, Lehmkuhl, 2010). Эти результаты подчёркивают отсутствие надёжных свидетельств существования обширного ледникового покрова в районе Верхоянского хребта во время LGM и позволяют предположить, что западная часть Северо-Восточной Сибири в этот период была преимущественно свободна ото льда.

Таким образом, многие ключевые вопросы, связанные с историей оледенения Верхоянского хребта, остаются нерешёнными и требуют дальнейших комплексных исследований. С целью восполнения существующих пробелов в знаниях о хронологии четвертичных ледниковых событий были проведены полевые исследования в долине р. Ундюлюнг (рис. 1) на западном склоне Верхоянского хребта, в ходе которых отобраны образцы на определение возраста методом космогенного датирования по  $^{10}\text{Be}$ .

## РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования — Верхоянский хребет, один из крупнейших горных массивов Северо-Восточной Азии, играющий ключевую роль в изучении масштабов и хронологии четвертичных оледенений региона. Хребет формирует дугообразную структуру, выгнутую на юго-запад, с шириной от 100 до 250 км и протяжённостью около 1200 км вдоль правобережья среднего и нижнего течения р. Лена — от её дельты до долины р. Томпо (бассейн Алдана).

В геологическом строении территории участвуют стратифицированные образования палеозоя и мезозоя, а также рыхлые кайнозойские накопления, представленные осадочными, вул-



**Рис. 1.** Обзорная карта северо-восточной Сибири. Условные обозначения: 1 — район исследования долины р. Ундылюнг; 2 — места проведения других исследований ледниковой хронологии, упомянутых в тексте статьи; 3 — крупные города. На врезке показан вид Северного полушария с расположением основной панели рисунка

**Fig. 1.** Overview map of northeastern Siberia. Legend: 1 — study area of the Undyulyung River valley; 2 — locations of other glacial chronology studies mentioned in the article; 3 — major cities. The inset shows a view of the Northern Hemisphere with the location of the main panel

каногенно-осадочными и вулканогенными формациями (Щербаков и др., 2008). Рельеф характеризуется высокой расчленённостью и наличием значительного количества отдельных хребтов. В центральной части абсолютные высоты достигают 2500–2900 м. Для западной провинции характерны среднегорные и низкогорные массивы с высотами от 800 до 2100 м. Типичен эрозионно-денудационный рельеф, сформировавшийся в результате интенсивной деятельности талых ледниковых вод и глубокого вреза речных долин на выровненных поверхностях, возникших в ходе позднечетвертичных тектонических поднятий (Гвоздецкий, 1968).

Климат региона резко континентальный, с продолжительной зимой и сравнительно низкими осадками. Холодный сезон длится 8–9 месяцев; средняя температура января на высотах

300–400 м может достигать  $-39^{\circ}\text{C}$  (Васильев, Торговкин, 2002). Из-за орографического эффекта климатическая асимметрия горных склонов чётко выражена: на западных склонах выпадает до 600–700 мм осадков в год, тогда как на восточных — менее 200 мм (Мурзин, 2003; Stauch, Lehmkuhl, 2010).

Растительный покров представлен преимущественно горной тундрой: кустарниково-лишайниковыми сообществами и скудной каменистой растительностью. Наивысшие отметки заняты поясами холодных пустынь, практически лишённых растительности (Гвоздецкий, 1968).

Верхоянский хребет представляет собой важный природный архив для исследования палеоледниковой динамики. Сочетание выраженной расчленённости рельефа, значительных высот

и климатической асимметрии способствовало формированию и сохранению горных ледников в четвертичный период (Баранова, Бискэ, 1964). Самые яркие следы этих процессов, включая системы конечных морен, фиксируются на западных склонах. В связи с этим для детального изучения ледниковых форм и отложений был выбран ключевой участок — долина р. Ундюлюнг (см. рис. 1), одного из крупнейших левобережных притоков Лены, дренирующего западные склоны хребта. Длина реки составляет 414 км, в нижнем течении выходит на Центрально-якутскую низменность и впадает в р. Лена на расстоянии 850 км от её устья. Полевые работы проведены от устья р. Ундюлюнг до хребтов Ундюлюнгский, Намыкыт и Серилле (см. рис. 3).

## МЕТОДЫ

Для решения поставленных задач был выполнен комплекс методов, направленных на реконструкцию ледниковых событий. В камеральный период проведён дистанционный анализ с использованием спутниковых снимков и цифровой модели рельефа высокой точности ArcticDEM (Porter et al., 2023). Это позволило выделить основные ледниковые комплексы, оценить степень их сохранности и выбрать участки с наибольшим потенциалом для дальнейших исследований. Основным критерием при картографировании служили морфологические признаки форм рельефа, в частности выраженность и сохранность гряд конечных морен.

Полевые исследования проводились в летний период 2021 г. в долине р. Ундюлюнг. В ходе работ из ледниковых отложений отобраны образцы для абсолютного датирования методом наземных космогенных радионуклидов (далее — НКР). Данный метод основан на выявлении редких радионуклидов, которые формируются при взаимодействии космического излучения с минералами горных пород. Он широко применяется в палеогляциологии для датирования ледниковых валунов, моренных комплексов, поверхностей ледниковой экзарации и других форм рельефа (Gosse, Phillips, 2001).

В рамках исследования отобраны 12 образцов коренных пород и валунов из кварцевых песчаников, имеющих следы ледниковой обработки (рис. 2). Отбор образцов проводился при помощи циркулярной пилы с верхних горизонтальных площадок валунов и выступов коренных пород глубиной до 9 см. Для каждо-

го образца зафиксированы топографические и геологические характеристики, необходимые для дальнейших расчётов, включающие координаты, высоту над уровнем моря, ориентацию поверхности и степень экранирования окружающим рельефом.

Основная цель лабораторной обработки — 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) с применением общепринятых методик, включая кислотную обработку, магнитную сепарацию, флотацию, очистку в ультразвуковой ванне. В результате определены концентрации *in situ*  $^{10}\text{Be}$  в каждом из 12 образцов и проведены расчёты их возраста.

Возраст экспонирования образцов рассчитывался с помощью онлайн-калькулятора CRONUS-Earth (Balco et al., 2008) (таблица).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**Геоморфологическое строение долины р. Ундюлюнг.** Исследуемый участок долины р. Ундюлюнг расположен в пределах области низкогорного рельефа с абсолютными отметками вершин в интервале 500–1000 м над ур. моря. Хребты выработаны на субстрате сложнодислоцированных терригенных пород палеозойского и мезозойского возраста. Склоны преимущественно средней крутизны (15–35°), однако встречаются и участки с крутыми (>35°) и даже отвесными склонами, что способствует широкому развитию гравитационных процессов. Водоразделы преимущественно сглаженные, пологоволнистые, разделённые низкими перевалами и сквозными долинами. Хребты ориентированы преимущественно в меридиональном направлении.

Поперечный профиль долины р. Ундюлюнг имеет выраженную U-образную форму, сформированную в ходе череды четвертичных оледенений. В горной части долина ориентирована с северо-востока на юго-запад и достигает ширины до 7 км. При выходе на предгорную равнину река поворачивает на северо-запад, ширина долины сокращается до 1.5 км, а затем, на расстоянии около 50 км от гор, вновь увеличивается до 3 км при впадении в р. Лену. Русло реки меандрирует, его ширина варьирует от 100 до 300 м. В днище до-



**Рис. 2.** Процесс отбора валунов циркулярной пилы (на фото В.М. Лыткин) (а); примеры валунов и коренных пород, отобранных для  $^{10}\text{Be}$  датирования поверхностей экспонирования в долине р. Ундюлюнг (б–е)

**Fig. 2.** Sampling of boulders using a circular saw (photo by V.M. Lytkin) (a); Examples of boulders and bedrock surfaces collected for  $^{10}\text{Be}$  exposure dating in the Undyulyung valley (б–е)

лины повсеместно развиты участки поймы, сложенные слабоотсортированными аллювиальными отложениями (галечно-валунный материал, 5–20 см).

Аккумулятивный рельеф представлен повсеместно, формируя пологонаклонные, холмисто-западинные и местами грядовые поверхности. Генетически эти формы связаны с аллювиальными, ледниковыми, ледниково-озёрными, флювиогляциальными и пролювиальными и эоловыми процессами. Ледниковые отложения представлены комплексами моренных гряд, сформированных в ходе неоднократных стадий отступления ледников.

Гляциогенная морфология долины представлена сериями моренных гряд, формировавшихся в ходе позднеплейстоценовых оледенений. В результате анализа материалов дистанционного дешифрирования (ArcticDEM, Porter et al., 2023) и полевых исследований в долине р. Ундюлюнг выделены пять моренных комплексов (I–V), отличающихся по морфологии, высотному положению и степени денудации (рис. 3). Характер гряд позволяет рассматривать их как результат деятельности ледников различной генетической природы (конечных, абляционных и основных морен), при этом не исключается формирование части комплексов за счёт деградации погребённых реликтов мореносодержащего льда.

**Таблица.** Результаты космогенного датирования образцов в долине р. Ундюлюнг

**Table.** Results of cosmogenic nuclide dating of samples from the Undyulyung River valley

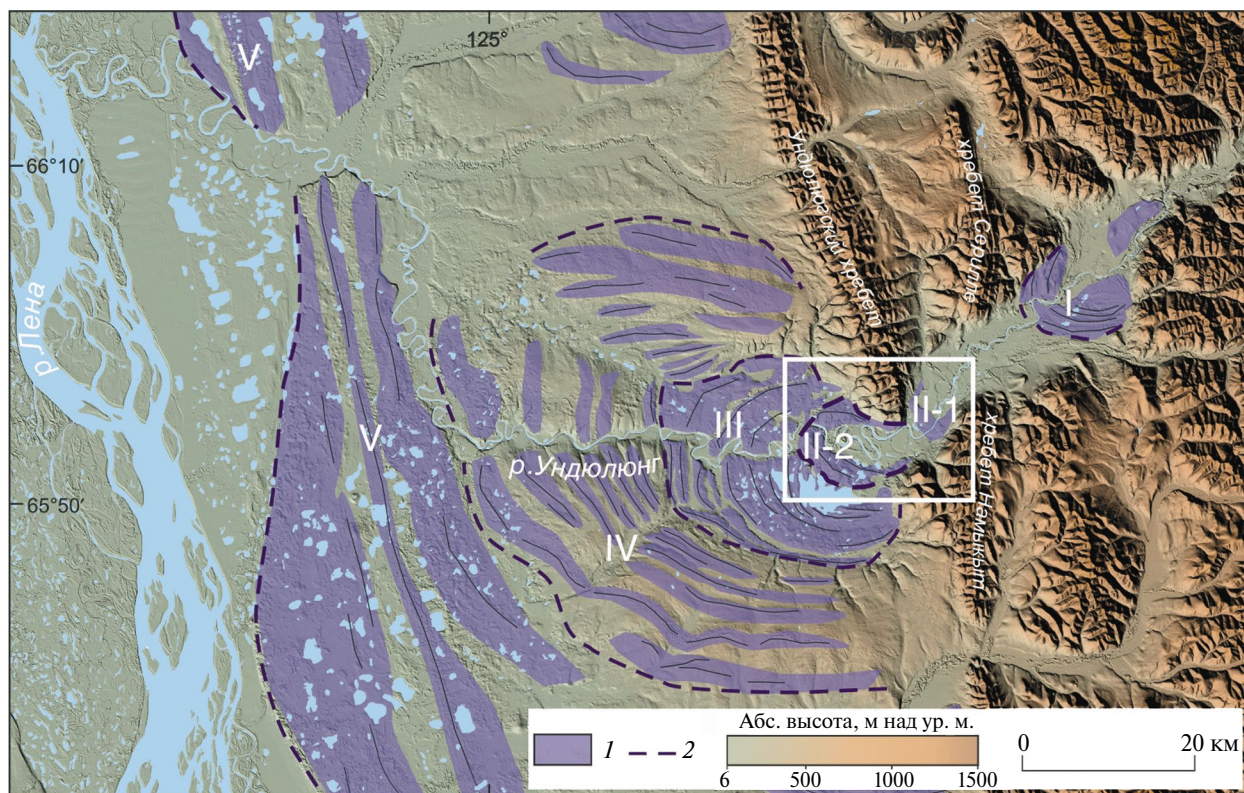
Номер образца	Широта	Долгота	Абс. высота (м над ур. моря)	Высота образца (см)	Толщина образца	Топографический фактор экранирования	Концентрация $^{10}\text{Be}$ ( $10^5$ ат/г)	Экспонированный возраст, тыс. л.
Und.1	65.9205°	125.9897°	391	20	5	0.999	$1.651 \pm 0.278$	$26.2 \pm 4.7$
Und.2	65.9206°	125.9897°	394	15	3	0.993	$1.328 \pm 0.172$	$20.8 \pm 2.9$
Und.3	65.9206°	125.9895°	395	15	4.5	0.999	$1.598 \pm 0.104$	$25.2 \pm 2.2$
Und.4	65.9206°	125.9892°	402	8	6	0.999	$1.814 \pm 0.708$	$28.8 \pm 2.0$
Und.5	65.9027°	126.0672°	111	500	3	0.999	$0.5494 \pm 0.0714$	$11.2 \pm 1.6$
Und.6	65.9027°	126.0672°	111	500	12	0.999	$0.5178 \pm 0.0801$	$11.4 \pm 1.9$
Und.7	65.9028°	126.0664°	107	90	6	0.997	$0.8744 \pm 0.0880$	$18.5 \pm 2.1$
Und.8	65.9030°	126.0674°	108	100	5	1	$1.263 \pm 0.351$	$26.5 \pm 7.6$
Und.9	65.9089°	126.0853°	150	300	4.5	0.993	$0.8525 \pm 0.0710$	$17.2 \pm 1.7$
Und.10	65.9094°	126.0855°	133	100	4	0.999	$0.8521 \pm 0.252$	$17.3 \pm 5.2$
Und.11	65.9095°	126.0857°	133	150	4.5	0.999	$0.8376 \pm 0.126$	$17.1 \pm 2.7$
Und. 12	65.9104°	126.0829°	118	100	4.5	1	$1.077 \pm 0.177$	$22.3 \pm 3.9$

Комплекс I приурочен к верховьям долины. Здесь выделяется от трёх до пяти конечно-моренных гряд, возвышающихся на 20–25 м над современным руслом. Отложения представлены диамиктоном. Абсолютные отметки поверхности I комплекса — 135 м над ур. моря, уреза реки — 115 м над ур. моря. Комплекс II расположен на месте выхода реки из горной части в районе Ундюлюнгского хребта на высоте 110 м над ур. моря. Здесь выделены участки с формами ледниково-аккумулятивного, экзарационно-эрозионного и экзарационного рельефа. В пределах комплекса выделены две моренные гряды (II-1 и II-2), которые, согласно полученным данным (см. ниже), относятся к одной стадии оледенения. Комплекс III занимает зону выхода реки на предгорную пологонаклонную равнину. Его поверхность располагается на высотах 100–120 м над ур. моря, а гряды возвышаются на 25–40 м над урезом воды. В пределах комплекса отмечается до восьми конечных гряд, а в разрезах вскрываются ледниковые и флювиогляциальные отложения, перекрытые пачками песчаных и лёссовидных отложений мощностью до 15 м. Комплекс IV выделяется в средней части предгорной равнины (80–100 м над ур. моря), пред-

ставлен сериями моренных гряд, достигающих 30–40 м над уровнем реки. Комплекс V локализован в нижнем течении реки. Его морфология выражена крутыми моренными грядами высотой до 50 м. Абсолютные отметки поверхности — 70–80 м над ур. моря.

Таким образом, конечные морены, сформированные на предгорной равнине (комплексы III–V), представляют собой классические предгорные формы рельефа, они покрыты мощными пачками песчаных и лёссовидных отложений эолового и озёрного происхождения. В горной части региона моренные комплексы I–II обладают более выраженной морфологией, с чёткими следами морозной сортировки и пучения.

**Результаты космогенного датирования по  $^{10}\text{Be}$ .** Основные результаты, представленные в статье, получены для моренного комплекса II, где были обнаружены ледниковые валуны и выходы коренных пород с признаками ледниковой экзарации, откуда отобраны образцы для космогенного датирования. Всего получено 12 дат на основе анализа содержания *in situ*  $^{10}\text{Be}$  (таблица). В пределах комплекса выделено три участка (рис. 4).



**Рис. 3.** Картографирование форм ледникового рельефа (обозначены фиолетовым цветом) в долине р. Ундюлюнг на западных предгорьях Верхоянского хребта. Область детальных исследований выделена белым прямоугольником. Римскими цифрами обозначены установленные моренные комплексы. В качестве основы использована цифровая модель рельефа высокого разрешения ArcticDEM (Porter et al., 2023).

Условные обозначения: 1 — ледниковые формы рельефа; 2 — границы максимальных продвижений ледников в пределах одного комплекса

**Fig. 3.** Mapping of glacial landforms (marked in purple) in the Undyulyung River valley, located in the western foothills of the Verkhoyansk Range. The detailed study area is outlined with a white rectangle. Roman numerals indicate the identified moraine complexes. Dashed lines show the maximum glacier extents within each complex. A high-resolution ArcticDEM digital elevation model (Porter et al., 2023) was used as the base map.

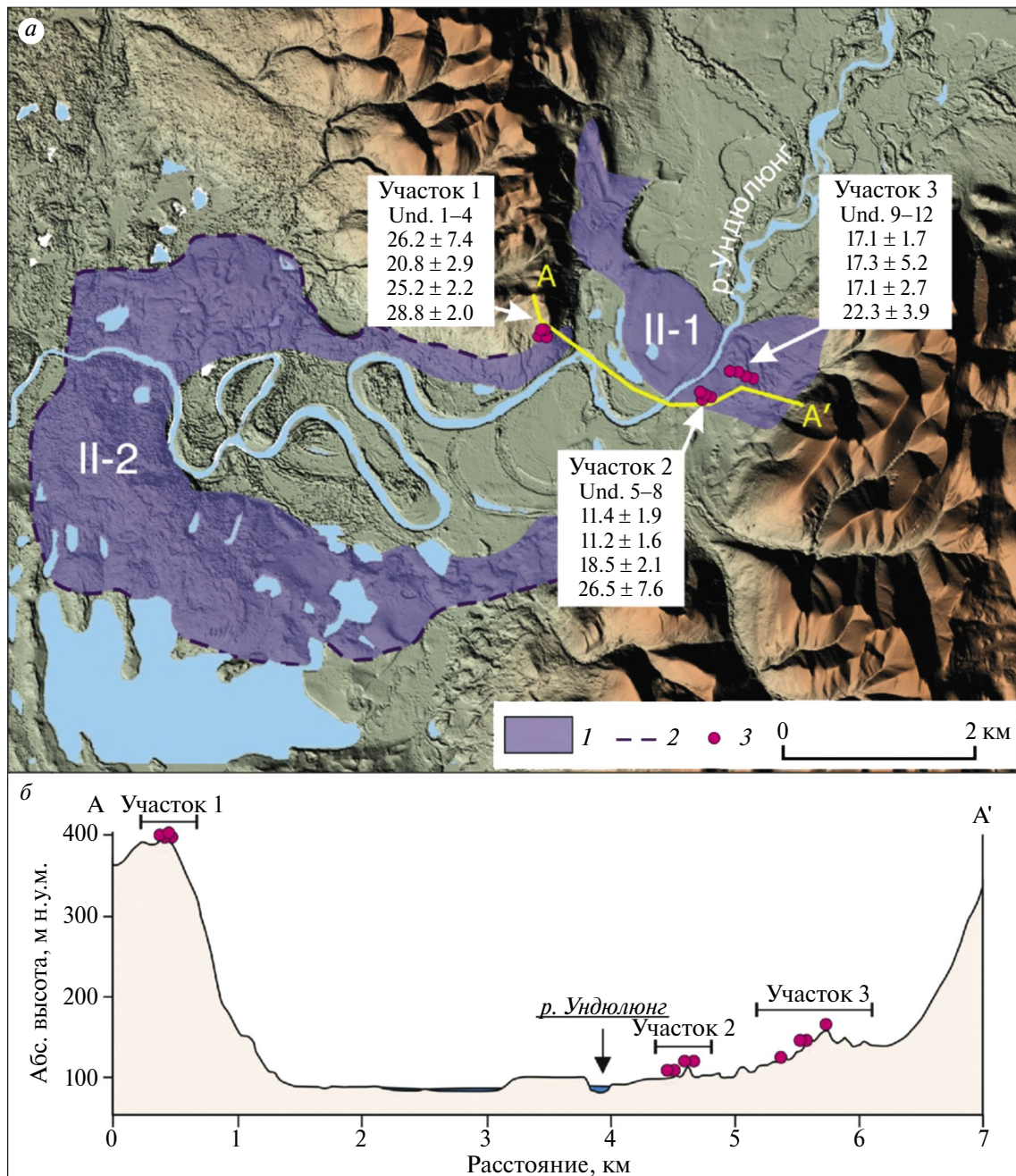
Legend: 1 — glacial landforms; 2 — boundaries of maximum glacier advance within a single complex

Участок 1 (см. рис. 4; рис. 5, а) располагается на водоразделе южного окончания хребта Ундюлюнгский на высоте 400 м над ур. моря. На поверхности выявлены хорошо обработанные ледником валуны (ледогранники) диаметром до 0.5 м, вероятно, являющиеся реликтами боковых морен. Здесь получено четыре даты:  $26.2 \pm 4.7$ ,  $20.8 \pm 2.9$ ,  $25.2 \pm 2.2$  и  $28.8 \pm 2.0$  тыс. л. (см. табл.).

Участок 2 (см. рис. 4) располагается в районе хребта Намыкыт и представляет собой ледниковый останец в виде гребня с узкой острой вершиной высотой до 10 м (см. рис. 5, б-в), на которой местами сохранены горизонтальные площадки коренных выходов песчаника. Абсолютная высота останца 111 м. Поверхность интенсивно раздроблена процессами выветривания, облом-

ки имеют острые грани и в элювии дают крупный щебень. Вокруг останца — фрагменты большого количества глыб размером до 3–5 м в диаметре со следами ледниковой штриховки и полировки. Также отмечаются фрагменты галечно-валунных отложений размерностью 5–30 см с песчано-суглинистым заполнителем. Для участка 2 два образца с плоской площадки на вершине останца дали возраст  $11.2 \pm 1.6$  и  $11.4 \pm 1.9$  тыс. лет и два образца из крупных валунов у основания дали возраст  $18.5 \pm 2.1$  и  $26.5 \pm 7.6$  тыс. лет (см. табл.).

Участок 3 (см. рис. 4) располагается северо-восточнее в 1 км от останца, где отмечается холмистая возвышенная поверхность, представленная выступами коренных песчаников, а также глыб и блоков размером до 5 м, в среднем 2–3 м (см. рис. 5, б-г). Вероятнее всего данная

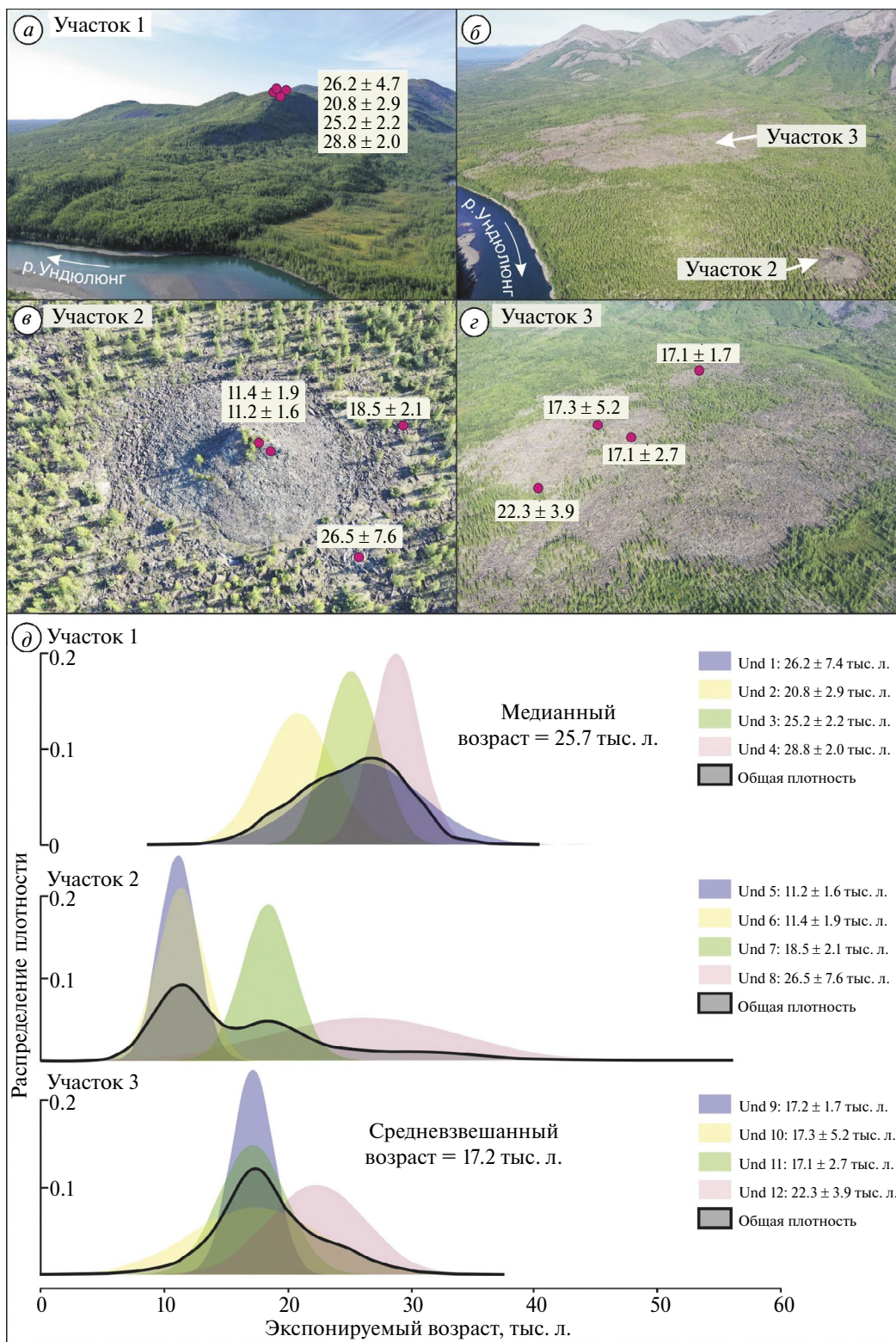


**Рис. 4.** Расположение участков исследования в долине Ундюлюнг и экспонированные  $^{10}\text{Be}$  возраста (а); Топографический профиль вдоль, иллюстрирующий относительные высоты участков (б). Условные обозначения: 1 — формы ледникового рельефа; 2 — граница максимального продвижения ледника в пределах исследуемого участка; 3 — места отбора проб на  $^{10}\text{Be}$

**Fig. 4.** Locations of the study sites in the Undyulyung valley and measured  $^{10}\text{Be}$  exposure ages (a); longitudinal topographic profile illustrating the relative elevations of the sampling sites (b). Legend: 1 – glacial landforms; 2 – boundary of maximum glacier advance within the study area; 3 –  $^{10}\text{Be}$  sampling locations

поверхность представляла из себя ригель, который впоследствии был переработан криогенным выветриванием. На некоторых участках видна скрыто-полигональная морозная сортировка, наблюдается растрескивание пород по свежим сколам. Встречаются поверхности

с ямками, углублениями, полостями, напоминающие ветровую корразию (это говорит о том, что блоки пород стабильны уже очень долгое время). Многие блоки несут на себе признаки интенсивной ледниковой обработки, такие как штриховка и отполированные грани. Результаты



**Рис. 5.** Расположение мест отбора образцов и экспонированные  $^{10}\text{Be}$  возраста: участок 1 на правом берегу р. Ундюлюнг (а); расположение участков 2 и 3 относительно друг друга на левом берегу р. Ундюлюнг (б); участки 2 и 3 соответственно (в–г); На вставке (д) показано распределение вероятностей с общей плотностью  $^{10}\text{Be}$  возрастов экспонирования образцов на участках исследования

**Fig. 5.** Locations of sample sites and measured  $^{10}\text{Be}$  exposure ages: Site 1 on the right bank of the Undyulyung River (a); Relative locations of sites 2 and 3 on the left bank of the Undyulyung River (б); Sites 2 and 3, respectively (в–г). Inset (д) shows the probability distribution with the overall density of  $^{10}\text{Be}$  ages of sample exposure at the study sites

датирования крупных валунных блоков с участка 3 дали хорошее распределение возрастов экспонирования:  $17.2 \pm 1.7$ ,  $17.3 \pm 5.2$ ,  $17.1 \pm 2.7$  и  $22.3 \pm 3.9$  тыс. лет (см. табл.).

### ОБСУЖДЕНИЕ

**Интерпретация <sup>10</sup>Ве датировок.** Совокупность полученных данных позволяет интерпретировать ледниковую историю региона следующим образом. Датировки на участке 1 на водоразделе (400 м над ур. моря.) хорошо соответствуют друг другу и отражают позднеплейстоценовую стабилизацию ледниковых валунов между 28 и 21 тыс. лет назад (соответствует периоду последнего ледникового максимума). При этом медианное значение возраста всех образцов равняется  $25.7 \pm 4.5$  тыс. лет (см. рис. 5, д). Медиана как устойчивый статистический показатель отражает наиболее репрезентативный возраст среди полученных значений и позволяет уверенно датировать рассматриваемую стадию ледниковой истории. Межквартильный размах свидетельствует о достаточно высокой согласованности возрастов, что указывает на одновременное или близкое по времени обнажение поверхности, скорее всего в результате быстрой деградации или стабилизации края ледника. В это время ледник с минимальной мощностью около 300 м полностью заполнял долины, о чём свидетельствует положение ледниковых валунов над современным уровнем реки. При этом край ледника мог выходить за пределы горной области, где предположительно сформировал моренную гряду II-2.

Для корректной интерпретации данных участка 2 необходимо сначала рассмотреть результаты, полученные на участке 3. Опробование валунов на этом участке из крупных блоков на разных высотах холмистой поверхности (ригель) дали компактное распределение экспонированных возрастов в диапазоне 17–22 тыс. лет. Три образца ( $17.1 \pm 2.7$ ,  $17.2 \pm 1.7$  и  $17.3 \pm 5.2$  тыс. лет) дают схожие значения, несмотря на различие в абсолютных высотах, на которых расположены эти точки. Это позволяет интерпретировать их как отражение времени дегляциации данной поверхности. Средневзвешенное значение возраста поверхности со стандартным отклонением на основе трёх образцов соответствует  $17.2 \pm 1.4$  тыс. лет (см. рис. 5, д), что указывает на быстрое таяние ледника и вскрытие поверхности ригеля в самом конце последнего ледникового максимума. Бо-

лее древняя дата — 22 тыс. лет — возможно, связана с унаследованием космогенных нуклидов от предыдущих циклов экспонирования.

Полученные на участке 3 данные позволяют уточнить хронологические рамки дегляциации на участке 2. Здесь зафиксированы как постгляциальные значения возраста отложений (~11 тыс. лет), так и более древние (~18–26 тыс. лет), что указывает на сложную историю денудации и, возможно, частичное повторное вскрытие поверхностей. Две даты  $18.4 \pm 2.1$  и  $26.3 \pm 7.5$  тыс. лет назад (см. рис. 5, е) возраста были получены для крупных валунов, расположенных у основания ледникового останца, и они отражают время деградации ледника и формирование конечной морены II-1 в ходе отступления ледника в позднем плейстоцене. Однако сопоставление с участком 3 (где три согласованных даты дают значение возраста 17.2 тыс. лет) и который располагается всего в 1 км выше по течению от участка 2 (см. рис. 5, б), позволяет заключить, что дата  $18.4 \pm 2.1$  тыс. лет более надёжно отражает момент окончательной дегляциации и стабилизации моренной поверхности участка 2, в то время как дата  $26.3 \pm 7.5$  тыс. лет, вероятно, слишком древняя и указывает на процессы унаследования радионуклидов. Таким образом, сравнительный анализ участков 2 и 3 указывает на синхронное завершение ледниковой дегляциации и формирование моренных форм II комплекса в интервале 17–18.4 тыс. лет назад, что соответствует поздней стадии LGM в регионе. Эта интерпретация подтверждается региональными климатическими реконструкциями, согласно которым в это время происходило потепление и сокращение площади ледникового покрова.

Вторые два образца на участке 2, отобранные с плоской вершины останца, дают значительно более молодые значения ( $11.1 \pm 1.6$  и  $11.3 \pm 1.8$ , см. рис. 5, б), что выбивается из общей хронологической последовательности. Эти значения возраста, вероятно, не отражают истинный момент дегляциации, а связаны с вторичными процессами, омолаживавшими поверхность. Возможные объяснения включают либо криогенное выветривание, вызвавшее локальную эрозию и удаление поверхностного слоя с накопленными космогенными нуклидами, либо временное покрытие останца рыхлыми отложениями, экранировавшими его от космического излучения, на что указывает наличие поблизости отложений валунов в понижениях и на прилегающих поверхностях.

Результаты датирования II комплекса указывают, что в интервале 28–21 тыс. лет назад в горной области существовал ледник, который сформировал боковые морены на участке I. Эти морены могут фиксировать как момент наступания ледника, так и стадии его стабилизации. К 17 тыс. лет назад на исследуемой территории произошла окончательная дегляциация ледника. Таким образом, данные оценки возраста дегляциации соответствует времени LGM.

**Ледниковая история Верхоянского хребта.** Результаты наших исследований в долине р. Ундюлюнг предоставляют убедительные свидетельства существования обширного горно-долинного оледенения на западных склонах Верхоянского хребта во время LGM. На основании геоморфологических наблюдений и космогенного датирования установлено, что в период максимального развития ледник полностью заполнял долину, достигая минимальной толщины не менее 300 м. Протяжённость ледниковой системы от осевой части хребта до района исследования могла составлять до 100 км, что свидетельствует о значительной экспансии ледников в высокогорных областях Восточной Сибири в это время.

Ключевой результат — определение времени существования и отступления ледника, основанное на  $^{10}\text{Be}$  датировках валунов в пределах комплекса II. Данные на участке I указывают на время существования края ледника в интервале между 28 и 21 тыс. лет назад. Наиболее молодые значения на участке 3 (~17 тыс. лет назад) фиксируют момент отступления ледника от исследуемого участка долины р. Ундюлюнг. Это согласуется с представлениями о временных рамках глобального LGM, ~26–19 тыс. лет назад (Clark et al., 2009).

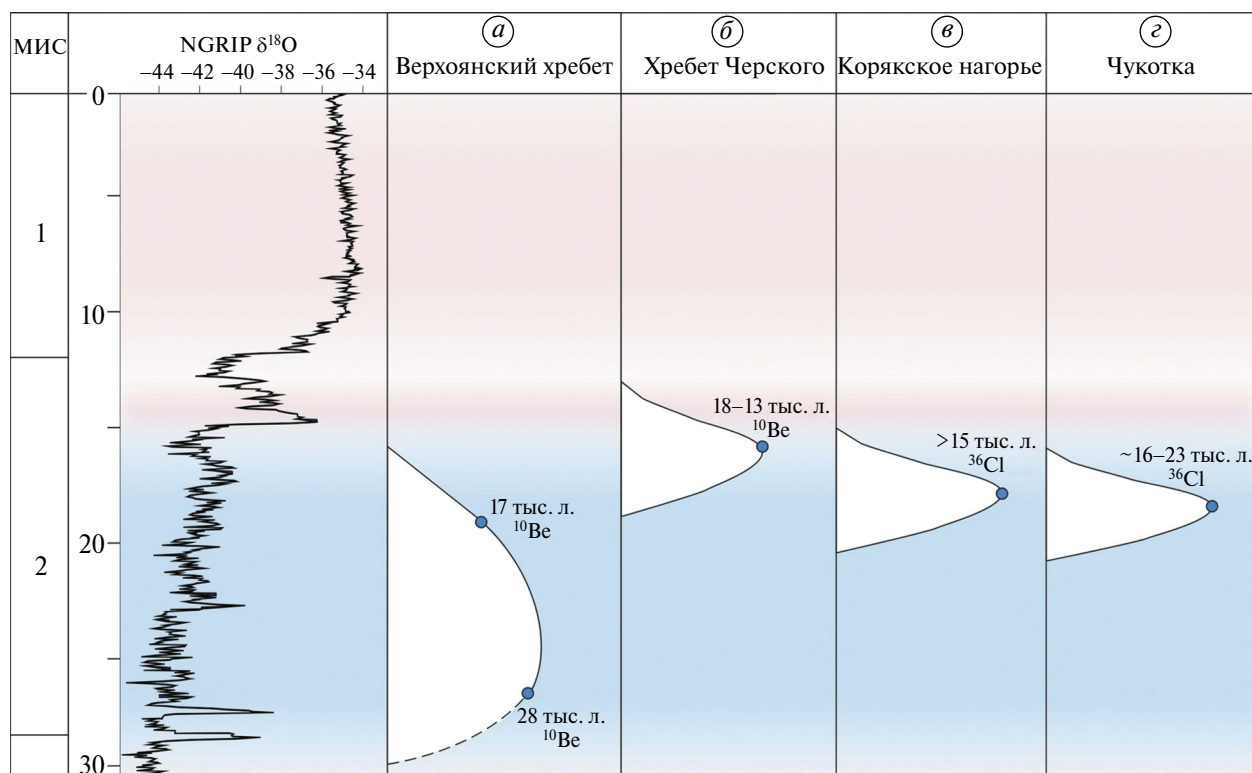
В верхней части долины р. Ундюлюнг выявлен более молодой моренный комплекс I. Он характеризуется свежей поверхностью форм, слабо выраженными следами денудации, что указывает на его пост-LGM происхождение. Предположено, что этот комплекс сформировался в ходе одной из стабилизаций или короткого наступания ледника в позднеледниковое время или даже в раннем голоцене. Однако отсутствие прямых датировок по этому комплексу не позволяет определить его возраст.

Геоморфологические данные, а также опубликованные материалы (Кинд и др., 1971; Stauch, Lehmkuhl, 2010; Barr, Clark, 2012), под-

тверждают, что аналогичные ледниковые формы существовали и в других долинах, прорезающих западный склон Верхоянского хребта. Конечные морены зафиксированы в долинах рек Дянушка, Тумара, Келе, Бегилян и Соболах-Маян, однако их возраст и генетическая принадлежность остаются предметом дискуссий. Согласно (Stauch, Lehmkuhl, 2010), основное оледенение в этом регионе могло иметь место более 50 тыс. лет назад, тогда как во время LGM территория хребта была частично свободна от ледников. Эти выводы основывались на ИКСЛ-датировках (инфракрасно-стимулированная люминесценция) валунов моренного комплекса I в долине Тумара —  $52.8 \pm 4.1$  и  $29.5 \pm 2.8$  тыс. лет. В то же время более ранние исследования (Кинд, 1971) предполагали существование оледенений не только в позднем плейстоцене, но и в голоцене, основываясь на радиоуглеродных датировках озёрно-аллювиальных отложений, перекрывающих морены. Тем не менее остаётся неясным, являются ли эти старые радиоуглеродные даты надёжными, учитывая, что они были измерены до обычного использования ускорительной масс-спектрометрии в радиоуглеродном датировании.

Полученные результаты хорошо вписываются в более широкий контекст ледниковой истории северо-востока Сибири. Так, в хребте Черского (долина Малык-Сиен) по данным космогенного датирования по  $^{10}\text{Be}$  формирование наиболее молодой морены происходило в интервале 18–13 тыс. лет назад (рис. 6, б; Nørgaard et al., 2023; Аржанников и др., 2024), что соответствует позднеледниковому времени. В Корякском нагорье (долины Ныгчеквеем и Находка), по результатам  $^{36}\text{Cl}$ -датирования, ледники достигали своих максимальных размеров между 21.6–11.6 и 16.6–14.7 тыс. лет назад соответственно (см. рис. 6, в; Gualtieri et al., 2000). На Чукотке (долина р. Кувевеем) наиболее молодые морены формировались в интервале между 23.6 и 16.2 тыс. лет назад (см. рис. 6, г; Brigham-Grette et al., 2003). Эти данные подтверждают, что пик активности горных ледников в различных регионах северо-востока Евразии нередко приходился на период после глобального LGM.

В долине р. Ундюлюнг также выделены более древние моренные комплексы (III–V), расположенные на предгорной равнине. Они характеризуются сглаженными формами, мощными толщами переотложенных и лёссовидных отложений, что позволяет предположить их формирование в ходе более ранних стадий оледенения.



**Рис. 6.** Наступания ледников во время LGM в Северо-Восточной Азии: Верхоянский хребет, данная работа (а); хребет Черского (Nørgaard et al., 2023; Аржанников и др., 2024) (б); Корякское нагорье (Gualtieri et al., 2000; Glushkova, 2001) (в); Чукотское нагорье (Brigham-Grette et al., 2003) (г). Проведена корреляция с данными ледяного ядра NGRIP (NGRIP members, 2004)

**Fig. 6.** Glacier advances during the Last Glacial Maximum in northeastern Asia: Verkhoyansk Range (this study) (a); Chersky Range (Nørgaard et al., 2023; Arzhannikov et al., 2024) (b); Koryak Highlands (Gualtieri et al., 2000; Glushkova, 2001) (c); Chukotka Highlands (Brigham-Grette et al., 2003) (d). Correlation with NGRIP ice core data (NGRIP members, 2004) is shown

По аналогии с данными из долин Тумара и Дянушка (Stauch, Lehmkühl, 2010) предположено, что эти комплексы сформировались во время стадий МИС 4 и МИС 6, соответственно.

**Сопоставление с региональными палеоклиматическими данными.** Палеоклиматические условия Северо-Восточной Азии реконструируются преимущественно на основе непрерывных осадочных летописей из озёрных кернов и ледовых комплексов вечной мерзлоты. Данные палинологического, седиментологического и геохимического анализа из озера Эльгыгыт-гын на Чукотке (Melles, 2012), озера Эликчан-4 в Северо-Охотский регионе (Ложкин, Андерсон, 2008), озера Биллях на Верхоянском хребте (Diekmann et al., 2017) (см. рис. 1) показывают, что в период МИС 2 климат был значительно холоднее и суше по сравнению с современным.

Палеоэкологические сигналы, полученные из ледовых комплексов едомы на побережье Вос-

точно-Сибирского и Лаптевского морей, а также из дельты Лены, подтверждают преобладание сухих условий и крайне низких летних и зимних температур во время LGM (Schirrmeister et al., 2002). Кроме того, по всей территории Якутии зафиксировано формирование эоловых отложений, начиная как минимум с 21 тыс. лет назад, в конце позднего плейстоцена (Колпаков, 1983; Lukuanycheva et al., 2024; Vasilieva et al., 2024). Подобные образования характерны для многих холодных регионов мира и интерпретируются как индикаторы аридного и холодного климата (Seppälä, 2012).

Новые данные, полученные в рамках нашего исследования Верхоянского хребта, свидетельствуют о наличии значительного оледенения на данной территории во время LGM, что указывает на существование благоприятных климатических условий для формирования горных ледников. Морены, картированные на предгорной равнине долины р. Ундюлюнг, не были датиро-

ваны в рамках данной работы, однако, по опубликованным материалам (Stauch, Lehmkuhl, 2010), могут коррелировать с оледенениями стадий МИС 6 и МИС 4. Это предположение подтверждается наличием мощных покровов лёссовидных отложений на поверхности этих морен, что типично для раннеплейстоценовых комплексов.

Таким образом, пространственный масштаб оледенения в данном регионе с течением времени уменьшался: ледники периода LGM существенно уступали в размерах более древним покровным ледникам. Расстояние от внешней границы самого древнего комплекса (комплекс V) до комплекса LGM (комплекс II), датированного в этом исследовании, составляет около 80 км. Такое сокращение площади оледенения, вероятнее всего, отражает тенденцию к уменьшению атмосферных осадков в позднем плейстоцене. Подобный тренд прослеживается и в других регионах Северного полушария — от северо-восточной Сибири (Arzhannikov et al., 2012; Margold et al., 2016) до северо-запада Северной Америки (Ward et al., 2007; Stroeven et al., 2014).

Повышение аридности в этом обширном по протяжённости регионе может быть связано как с ростом западной части Евразийского ледникового щита, блокировавшего перенос влаги на восток, так и с изменением циркуляции струйных течений, вызванным усилением Лаврентийского ледникового щита (Krinner, 2011; Löfverström et al., 2014).

## ВЫВОДЫ

Представлены новые данные, свидетельствующие о значительном оледенении Верхоянского хребта в период LGM. В ходе исследования получены двенадцать дат экспозиции  $^{10}\text{Be}$  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 указывает на существование горно-долинного ледника на высоте около 300 м над ур. дна долины в период между 28 и 17 тыс. лет назад. Полученные данные пересматривают прежние гипотезы, согласно которым западные склоны Верхоянского хребта оставались преимущественно свободными ото льда на протяжении последних 50 тыс. л. (Stauch, Lehmkuhl, 2010). Результаты подтверждают тенденцию к сокра-

щению ледникового покрова в Северо-Восточной Сибири в течение позднего плейстоцена, что, возможно, отражает усиление аридизации этого региона с течением времени.

**Благодарности.** Авторы выражают глубокую признательность [† А.А. Галанину] за организацию и финансирование полевых работ, а также за научное руководство и поддержку. Особая благодарность сотрудникам Института мерзлотоведения, с которыми проведены полевые исследования, за энтузиазм, настойчивость и командный дух в условиях труднодоступных маршрутов. Коллектив авторов также благодарит датских коллег, в особенности Мадса Кнудсена за содействие в организации аналитических работ и возможность проведения измерений в лабораториях космогенного датирования.

Работа выполнена в рамках гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2024-554 от 24.04.2024) и научно-исследовательского проекта № 122011800064-9 “Строение и ключевые этапы эволюции континентальной криолитозоны в неоплейстоцене и голоцене”.

**Acknowledgments.** The authors express their deep appreciation to [† A.A. Galanin] for organizing and funding the fieldwork, as well as for his scientific guidance and support. Special thanks are extended to the staff of the Institute of Permafrost Studies, who participated in the field campaigns, for their enthusiasm, perseverance, and team spirit under the challenging conditions of remote mountain routes in Yakutia. The authors also thank their Danish colleagues, especially Mads Knudsen, for assistance in organizing the analytical work and providing access to cosmogenic nuclide dating laboratories. This research was carried out with support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2024-554 dated 24.04.2024) and scientific research project No. 122011800064-9 “Structure and Key Stages of Evolution of the Continental Permafrost in the Pleistocene and Holocene”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аржанников С.Г., Аржанникова А.В., Чеботарев А.А., Торговкин Н.В., Семиколенных Д.В., Лукьянычева М.С., Курбанов Р.Н. Опыт применения метода космогенного датирования ( $^{10}\text{Be}$ ) 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.  
<https://doi.org/10.31857/S2949178924030039>
- Баранова Ю.П., Бискэ С.Ф. Северо-Восток СССР. Наука, 1964. 304 с.
- Васильев И.С., Торговкин Я.И. Пространственное распределение осадков в Якутии // Метеорология и гидрология. 2002. № 6. С. 23–32.
- Гвоздецкий Н.А. Физико-географическое районирование СССР. 1968. 578 с.
- Кинд Н.В., Колтаков В.В., Сулержицкий Л.Д. О возрасте оледенений Верхоянья // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1971. № 10. С. 135–144.
- Колтаков В.В. Эоловые четвертичные отложения приленской Якутии // Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода. 1983. № 52. С. 123–131.
- Ложкин А.В., Андерсон П.М., Матросова Т.В., Соломаткина Т.Б. Опыт изучения озерных пыльцевых летописей для реконструкции природной среды Берингии в четвертичный период // Вестник Дальневосточного отделения РАН. 2008. № 1. С. 24–32.
- Мурзин Ю.А. Ледники Якутии // Наука и техника в Якутии. 2003. № 2 (5). С. 102–107.
- Щербаков О.И., Кропачев А.П., Гамянин Г.Н., Гриненко В.С., Князев В.Г., Метелев В.И., Павлова И.В., Прокопьев А.В., Розинов М.И., Серкина Г.Г., Сметанникова Л.И., Трущелов А.М., Федорова С.С. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист Q52 — Верхоянские цепи. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2008. 335 с.
- Arzhannikov S.G., Braucher R., Jolivet M., Arzhannikova A.V., Vassallo R., Chauvet A., Bourlès D., Chauvet F. History of late Pleistocene Glaciations in the Central Sayan-Tuva Upland (Southern Siberia). // *Quaternary Science Reviews*. 2012. V. 49. P. 16–32.  
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.06.005>
- 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. V. 53. P. 72–87.
- Balco G., Stone J.O., Lifton N.A., Dunai T.J. A Complete and Easily Accessible Means of Calculating Surface Exposure Ages or Erosion Rates from <sup>10</sup>Be and <sup>26</sup>Al Measurements // *Quaternary Geochronology*. 2008. V. 3. No. 3. P. 174–195.  
<https://doi.org/10.1016/j.quageo.2007.12.001>
- Brigham-Grette J., Gualtieri L.M., Glushkova O.Y., Hamilton T.D., Mostoller D., Kotov A. Chlorine-36 and <sup>14</sup>C Chronology Support a Limited Last Glacial Maximum Across Central Chukotka, Northeastern Siberia, and no Beringian Ice Sheet // *Quaternary Research*. 2003. V. 59. No. 3. P. 386–398.  
[https://doi.org/10.1016/S0033-5894\(03\)00058-9](https://doi.org/10.1016/S0033-5894(03)00058-9)
- Clark P.U., Dyke A.S., Shakun J.D., Carlson A.E., Clark J., Wohlfarth B., McCabe A.M. The Last Glacial Maximum // *Science*. 2009. V. 325. No. 5941. P. 710–714.  
<https://doi.org/10.1126/science.1172873>
- Diekmann B., Pestryakova L., Nazarova L., Subetto D., Tarasov P.E., Stauch G., Müller S. Late Quaternary Lake Dynamics in the Verkhoyansk Mountains of Eastern Siberia: Implications for Climate and Glaciation History // *Polarforschung*. 2017. V. 86. No. 2. P. 97–110.  
<https://doi.org/10.2312/polarforschung.86.2.97>
- Glushkova O.Y. Geomorphological Correlation of Late Pleistocene Glacial Complexes of Western and Eastern Beringia // *Quaternary Science Reviews*. 2001. V. 20. No. 1–3. P. 405–417.
- Gualtieri L., Glushkova O., 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. V. 112. No. 7. P. 1106–1118.  
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2000\)112<1106:EFRIED>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2000)112<1106:EFRIED>2.0.CO;2)
- Gosse J.C., Phillips F.M. Terrestrial In Situ Cosmogenic Nuclides: Theory and Application // *Quaternary Science Reviews*. 2001. V. 20. No. 14. P. 1475–1560.
- Krinner G., Diekmann B., Colleoni F., Stauch G. Global, Regional and Local Scale Factors Determining Glaciation Extent in Eastern Siberia over the Last 140,000 Years // *Quaternary Science Reviews*. 2011. V. 30. No. 7–8. P. 821–831.
- Löfverström M., Caballero R., Nilsson J., Kleman J. Evolution of the large-scale atmospheric circulation in response to changing ice sheets over the last glacial cycle // *Climate of the Past*. 2014. V. 10. No. 4. P. 1453–1471.
- Lukyanycheva M., Kurbanov R., Taratunina N., Vasilieva A., Lytkin V., Panin A., Anokin A., Stevens T., Murray A., Buylaert J.-P., Knudsen M. Dating Post-LGM Aeolian Sedimentation and the Late Palaeolithic in Central Yakutia (Northeastern Siberia) // *Quaternary Geochronology*. 2024. No. 83. P. 101563.  
<https://doi.org/10.1016/j.quageo.2024.101563>
- Melles M., Brigham-Grette J., Glushkova O.Y., Minyuk P.S., Nowaczyk N.R., Hubberten H.W. Sedimentary Geochemistry of Core PG1351 from Lake El'gygytgyn—a Sensitive Record of Climate Variability in the East Siberian Arctic During the Past Three Glacial–Interglacial Cycles // *Journal of Paleolimnology*. 2007. V. 37. P. 89–104.  
<https://doi.org/10.1007/s10933-006-9025-6>
- Margold M., Jansen J.D., Gurinov A.L., Codilean A.T., Fink D., Preusser F., Reznichenko N.V., Mifsud C. Extensive Glaciation in Transbaikalia, Siberia, at the Last Glacial Maximum // *Quaternary Science Reviews*. 2016. No. 132. P. 161–174.  
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.11.018>

- Nørgaard J., Margold M., Jansen J.D., Kurbanov R., Szuman I., Andersen J.L., Olsen J., Faurischou Knudsen M. Absence of Large-Scale Ice Masses in Central Northeast Siberia During the Late Pleistocene // *Geophysical Research Letters*. 2023. V. 50. No. 10. P. e2023GL103594.
- Porter C., Howat I., Noh M.J., Husby E., Khuvis S., Danish E., Tomko K., Gardiner J., Negrete A., Yadav B., Klassen J., Kelleher C., Cloutier M., Bakker J., Enos J., Arnold G., Bauer G., Morin P. ArcticDEM—Mosaics, Version 4.1 // Harvard Dataverse. 2023. <https://doi.org/10.7910/DVN/3VDC4W>
- Schirmer L., Siegert C., Kuznetsova T., Kuzmina S., Andreev A., Kienast F., Bobrov A. Paleoenvironmental and Paleoclimatic Records from Permafrost Deposits in the Arctic Region of Northern Siberia // *Quaternary International*. 2002. V. 89. No. 1. P. 97–118. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(01\)00083-0](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(01)00083-0)
- Stauch G., Lehmkühl F. Quaternary Glaciations in the Verkhoyansk Mountains, Northeast Siberia // *Quaternary Research*. 2010. V. 74. No. 1. P. 145–155
- Stroeven A.P., Fabel D., Margold M., Clague J.J., Xu S. Investigating Absolute Chronologies of Glacial Advances in the NW Sector of the Cordilleran Ice Sheet with Terrestrial In Situ Cosmogenic Nuclides // *Quaternary Science Reviews*. 2014. No. 92. P. 429–443. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.09.026>
- Seppälä M. Wind as a Geomorphic Agent in Cold Climates. Cambridge University Press. 2012.
- Vasilieva A.N., Murray A.S., Taratunina N.A., Buylaert J.-P., Lytkin V.M., Shaposhnikov G.I., Stevens T., Ujvari G., Kertész T.G., Kurbanov R.N. Absolute Dating of Sediments Forming the Lena River Terraces (Northeastern Siberia) // *Quaternary Geochronology*. 2024. No. 83. Article 101592. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2024.101592>

**Citation: Lukyanycheva M.S., Vasilieva A.N., Lytkin V.M., Kurbanov R.N. Glaciation of the Western Foothills of the Verkhoyansk Range During the Late Glacial Maximum (LGM). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2026, 66 (1): 138–154. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376526010104**

## Glaciation of the Western Foothills of the Verkhoyansk Range During the Last Glacial Maximum (LGM)

© 2026 M. S. Lukyanycheva<sup>a, #</sup>, A. N. Vasilieva<sup>a, b</sup>, V. M. Lytkin<sup>b</sup>, R. N. Kurbanov<sup>a, c</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Geography RAS, Moscow, Russia*

<sup>b</sup>*Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of RAS, Yakutsk, Russia*

<sup>c</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

<sup>#</sup>*e-mail: mashluk95@gmail.com*

Received July 11, 2025; revised September 14, 2025; accepted December 29, 2025

The article presents the chronology and extent of Quaternary glaciations in North-Eastern Siberia, using the Verkhoyansk Range as an example. This Range is one of the largest and least studied mountain ranges in the region. We analyzed available geomorphological and stratigraphic data, as well as the present-day dating techniques (in particular, cosmogenic dating using  $^{10}\text{Be}$ ) applied to glacial deposits and landforms in the Undyulyung River valley. The results obtained on the basis of 12 exposure ages from content of *in situ*  $^{10}\text{Be}$  in glacial boulders and bedrocks testify to the presence of a large mountain-valley glaciation in the Late Pleistocene. Glaciers filled the valleys and extended over 100 km westward from the central axis of the Ridge during the Last Glacial Maximum (LGM) that is approximately 28–17 ka. Field investigations and new dating results made possible more correct definition of the time frame of the glaciers' deglaciation and confirmation that ice thickness during this period reached up to 300 meters. The extent of glaciation likely covered significant areas of the western slopes of the range. A comparison with regional paleoclimatic and geochronological data indicates synchronicity in Late Pleistocene deglaciation stages across North-Eastern Siberia and highlights the importance of  $^{10}\text{Be}$  dating for reconstructing the glacial dynamics. Finally, our findings support the hypothesis of a stage-by-stage reduction in the volume of the ice cover in the North-Eastern Siberia during the Late Pleistocene. This work highlights the importance of the Verkhoyansk Range as a natural archive for paleoclimate reconstruction in North-Eastern Asia and emphasizes the need for further comprehensive research to resolve existing controversial issues related to the history of glaciations in the region.

**Keywords:** moraines, mountain-valley glaciers, cosmogenic dating,  $^{10}\text{Be}$ , Pleistocene, paleoclimate, Yakutia

## REFERENCES

- Arzhannikov S.G., Arzhannikova A.V., Chebotarev A.A., Torgovkin N.V., Semikolennykh D.V., Lukyanycheva M.S., Kurbanov R.N. Experience of Applying the Cosmogenic Dating Method ( $^{10}\text{Be}$ ) to Assess the Age and Scale of the Pleistocene Glaciation in North-Eastern Siberia (Based on the Example of Glacier Complexes of the Chersky Ridge). *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. Geomorphology and Paleogeography. 2024, 55 (3): 53–72. [In Russian]  
<https://doi.org/10.31857/S2949178924030039>
- Baranova Yu.P., Biske S.F. Severo-Vostok SSSR. Northeast of the USSR. Science, 1964: 304 p. [In Russian]
- Vasil'ev I.S., Torgovkin Ya.I. Spatial Distribution of Precipitation in Yakutia. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2002, 6: 23–32. [In Russian]
- Gvozdeckiy N.A. Fiziko-geograficheskoe rayonirovanie SSSR. Physical and Geographical Zoning of the USSR. 1968: 578 p. [In Russian]
- Kind N.V., Kolpakov V.V., Sulerzhitskiy L.D. On the Age of Glaciations in the Verkhoyansk Region. *Izvestiya Ros. Akad. Nauk. Seriya geograficheskaya*. Proc. of RAS. Geographical series. 1971, 10: 135–144. [In Russian]
- Kolpakov V.V. Aeolian Quaternary Deposits in the Prilensky Part of Yakutia. *Byulleten' Komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda*. Bulletin of the Commission for the Study of the Quaternary Period. 1983, 52: 123–131. [In Russian]
- Lozhkin A.V., Anderson P.M., Matrosova T.V., Solomatkina T.B. Studying Lake Pollen Records for Quaternary Environmental Reconstructions in Beringia. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk*. Herald of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. 2008, 1: 24–32. [In Russian]
- Murzin Yu.A. Glaciers of Yakutia. *Nauka i tekhnika v Yakutii*. Science and Technology in Yakutia. 2003, 2 (5): 102–107. [In Russian]
- Shcherbakov O.I., Kropachev A.P., Gamyarin G.N., Grinenko V.S., Knyazev V.G., Metelev V.I., Pavlova I.V., Prokopyev A.V., Rozinov M.I., Serkina G.G., Smetannikova L.I., Trushchelev A.M., Fedorova S.S. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1 000 000 (tretye pokolenie). *Seriya Verkhoyano-Kolymskaya. List Q52 — Verkhoyanskies tsepi. Ob'yasnitel'naya zapiska*. State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (Third Generation). Verkhoyano-Kolyma Series. Sheet Q52 — Verkhoyansk Ranges. Explanatory Note. Saint Petersburg: VSEGEI Cartographic Factory. 2008: 335 p. [In Russian]
- Arzhannikov S.G., Braucher R., Jolivet M., Arzhannikova A.V., Vassallo R., Chauvet A., Bourlès D., Chauvet F. History of Late Pleistocene Glaciations in the Central Sayan-Tuva Upland (Southern Siberia). *Quaternary Science Review*. 2012, 49: 16–32.  
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.06.005>
- 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 Sci. Rev.* 2012, 53: 72–87.  
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.08.004>
- Balco G., Stone, J.O., Lifton, N.A., Dunai, T.J. A Complete and Easily Accessible Means of Calculating Surface Exposure Ages or Erosion Rates from  $^{10}\text{Be}$  and  $^{26}\text{Al}$  Measurements. *Quaternary Geochronology*. 2008, 3 (3): 174–195.
- Brigham-Grette J., Gualtieri L. M., Glushkova O.Y., Hamilton T.D., Mostoller D., Kotov A. Chlorine-36 and  $^{14}\text{C}$  Chronology Support a Limited Last Glacial Maximum Across Central Chukotka, Northeastern Siberia, and no Beringian Ice Sheet. *Quaternary Research*. 2003, 59 (3): 386–398.  
[https://doi.org/10.1016/S0033-5894\(03\)00058-9](https://doi.org/10.1016/S0033-5894(03)00058-9)
- Clark P.U., Dyke A.S., Shakun J.D., Carlson A.E., Clark J., Wohlfarth B., McCabe A.M. The Last Glacial Maximum. *Science*. 2009, 325 (5941): 710–714.  
<https://doi.org/10.1126/science.1172873>
- Diekmann B., Pestryakova L., Nazarova L., Subetto D., Tarasov P. E., Stauch G., Müller S. Late Quaternary Lake Dynamics in the Verkhoyansk Mountains of Eastern Siberia: Implications for Climate and Glaciation History. *Polarforschung*. 2017, 86 (2): 97–110.  
<https://doi.org/10.2312/polarforschung.86.2.97>
- Glushkova O.Y. Geomorphological correlation of Late Pleistocene Glacial Complexes of Western and Eastern Beringia. *Quaternary Science Reviews*. 2001, 20 (1–3): 405–417.
- Gualtieri L., Glushkova O., 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, 112 (7): 1106–1118.  
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2000\)112<1106:EFRIED>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2000)112<1106:EFRIED>2.0.CO;2)
- Gosse J.C., Phillips F.M. Terrestrial In Situ Cosmogenic Nuclides: Theory and Application. *Quaternary Science Reviews*. 2001, 20 (14): 1475–1560.
- Krinner G., Diekmann B., Colleoni F., Stauch G. Global, Regional and Local Scale Factors Determining Glaciation Extent in Eastern Siberia over the Last 140,000 Years. *Quaternary Science Reviews*. 2011, 30 (7–8): 821–831.
- Löfverström M., Caballero R., Nilsson J., Kleman, J. Evolution of the Large-Scale Atmospheric Circulation in Response to Changing Ice Sheets over the Last Glacial Cycle. *Climate of the Past*. 2014, 10 (4):1453–1471.

- Lukyanycheva M., Kurbanov R., Taratunina N., Vasilieva A., Lytkin V., Panin A., Anoikin A., Stevens T., Murray A., Buylaert J.-P., Knudsen M.* Dating Post-LGM Aeolian Sedimentation and the Late Palaeolithic in Central Yakutia (Northeastern Siberia). *Quaternary Geochronology*. 2024, 83: 101563.  
<https://doi.org/10.1016/j.quageo.2024.101563>
- Melles M., Brigham-Grette J., Glushkova O.Y., Minyuk P.S., Nowaczyk N.R., Hubberten H.W.* Sedimentary Geochemistry of Core PG1351 from Lake El'gygytgyn—a Sensitive Record of Climate Variability in the East Siberian Arctic During the Past Three Glacial–Interglacial Cycles. *Journal of Paleolimnology*. 2007, 37: 89–104.  
<https://doi.org/10.1007/s10933-006-9025-6>
- Margold M., Jansen J.D., Gurinov A.L., Codilean A.T., Fink D., Preusser F., Reznichenko N.V., Mifsud C.* Extensive Glaciation in Transbaikalia, Siberia, at the Last Glacial Maximum. *Quat. Sci. Rev.* 2016, 132: 161–174.  
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.11.018>
- Nørgaard J., Margold M., Jansen J.D., Kurbanov R., Szuman I., Andersen J.L., Olsen J., Faurischou Knudsen M.* Absence of Large-Scale Ice Masses in Central Northeast Siberia During the Late Pleistocene. *Geophysical Research Letters*. 2023, 50 (10): e2023GL103594.
- Porter C., Howat I., Noh M.J., Husby E., Khuvis S., Danish E., Tomko K., Gardiner J., Negrete A., Yadav B., Klassen J., Kelleher C., Cloutier M., Bakker J., Enos J., Arnold G., Bauer G., Morin P.* “ArcticDEM — Mosaics, Version 4.1”, Harvard Dataverse. 2023.  
<https://doi.org/10.7910/DVN/3VDC4W>
- Schirmermeister L., Siegert C., Kuznetsova T., Kuzmina S., Andreev A., Kienast F., Bobrov A.* Paleoenvironmental and Paleoclimatic Records from Permafrost Deposits in the Arctic Region of Northern Siberia. *Quaternary International*. 2002, 89 (1): 97–118.  
[https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(01\)00083-0](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(01)00083-0)
- Stauch G., Lehmkuhl F.* Quaternary Glaciations in the Verkhoyansk Mountains, Northeast Siberia. *Quaternary Research*. 2010, 74 (1): 145–155.  
<https://doi.org/10.1016/j.yqres.2010.04.003>
- Stroeven A.P., Fabel D., Margold M., Clague J.J., Xu S.* Investigating Absolute Chronologies of Glacial Advances in the NW Sector of the Cordilleran Ice Sheet with Terrestrial In Situ Cosmogenic Nuclides. *Quaternary Science Reviews*. 2014, 92: 429–443.  
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.09.026>
- Seppälä M.* Wind as a Geomorphic Agent in Cold Climates. Cambridge University Press. 2012.
- Vasilieva A.N., Murray A.S., Taratunina N.A., Buylaert J.-P., Lytkin V.M., Shaposhnikov G.I., Stevens T., Ujvari G., Kertész T.G., Kurbanov R.N.* Absolute Dating of Sediments Forming the Lena River Terraces (Northeastern Siberia). *Quaternary Geochronology*. 2024, 83: 101592.  
<https://doi.org/10.1016/j.quageo.2024.101592>