

КАТАФЛЮВИАЛЬНЫЕ СОБЫТИЯ В ЧЕТВЕРТИЧНОЙ ИСТОРИИ  
СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ

УДК 551.435.1→551.89(517)

ДАРХАДСКОЕ ПАЛЕООЗЕРО И ДАРХАДСКИЕ ГЛЯЦИАЛЬНЫЕ СУПЕРПАВОДКИ  
В КОНТЕКСТЕ КАТАФЛЮВИАЛЬНЫХ СОБЫТИЙ СЕВЕРНОЙ АЗИИ  
В ПОЗДНЕМ ПЛЕЙСТОЦЕНЕ<sup>#</sup>

© 2024 г. С. Г. Аржанников<sup>1,\*</sup>, А. В. Аржанникова<sup>1</sup>, Р. Броше<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Национальный центр научных исследований, Экс-ан-Прованс, Франция

<sup>3</sup>Европейский центр исследований и преподавания в области геонаук  
об окружающей среде, Экс-ан-Прованс, Франция

\* E-mail: sarzhan@crust.irk.ru

Поступила в редакцию 16.01.2024 г.

После доработки 14.04.2024 г.

Принята к публикации 25.09.2024 г.

Одними из экстремальных событий позднего плейстоцена в Северной Азии являются гидросферные катастрофы, связанные с прорывами и спусками ледниково-подпрудных озер. Комплексное изучение и выявление причинно-следственных связей формирования гляциальных суперпаводков (мегапаводков, мегафладов) и их рельефообразующей роли является одним из важных направлений палеогеографии. В рамках данной проблемы проведен комплекс геоморфологических и геохронологических исследований, направленный на определение причин формирования ледниково-подпрудного Дархадского палеоозера и возраста дархадских гляциальных суперпаводков. Охарактеризованы основные формы рельефа и осадочные толщи от Дархадской впадины до хребта Западный Саян, образованные в зоне динамического влияния суперпаводка. На основе анализа, космоснимков, цифровой модели рельефа, картирования и реконструкции получены новые данные об условиях формирования ледниковой дамбы в долине р. Шишхид-Гол. Слияние крупных ледников из долин рек Хара-Бярангийн-Гол и Их-Жамс-Гол ниже устья р. Тэнгисийн-Гол образовало подпор р. Шишхид-Гол высотой 300 м. Наличие древних береговых линий, имеющих абс. высоту до 1713 м, в непосредственной близости от вновь выделенной ледниковой плотины свидетельствует о ее доминирующей роли в образовании Дархадского палеоозера. В пределах Дархадской впадины, путем анализа абс. высот максимально высокой береговой линии Дархадского палеоозера, выявлены нисходящие тектонические движения за последние 18–23 тыс. л. с амплитудой 27 м. В результате полевых исследований и датирования по космогенному изотопу (<sup>10</sup>Be) получены первые даты по экспонированию валунов в пределах четырех полей гигантской ряби течения (ПГРТ), а также эрратического валуна в пределах бара в долине р. Каа-Хем. Распределение 14 образцов на временной шкале показало три пика дат в интервале 38–18 тыс. л. н. Два из них соответствуют двум суперпаводкам 38–36 тыс. л. и 23–18 тыс. л. и один, промежуточный, связан с прерывистым экспонированием в результате воздействия второго суперпаводка на экспозицию валунов в пределах ГРТ.

**Ключевые слова:** позднеплейстоценовое оледенение, ледниково-подпрудное озеро, гигантская рябь течения, датирование по космогенному изотопу (<sup>10</sup>Be)

DOI: 10.31857/S2949178924040069, EDN: FGTNSC

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Очередное планетарное похолодание в позднем плейстоцене создало условия для оледенения и выдвигания ледников на значительных территориях, как в полярных областях, так и в горных поя-

сах. У краевых частей ледниковых щитов, а также в горных долинах или впадинах, блокированных ледниками, формировались ледниково-подпрудные озера различных размеров с объемами, составляющими тысячи, десятки тысяч и даже сотни тысяч км<sup>3</sup> воды (Clarke et al., 2004; Margold et al., 2011; Norris et al., 2021). При климатических вариациях, по сейсмическим причинам или в силу физических свойств льда происходило разрушение ледниковых плотин. Это приводило к спуску ледниково-подпрудных озер и образованию гляциальных суперпаводков, или мегапаводков,

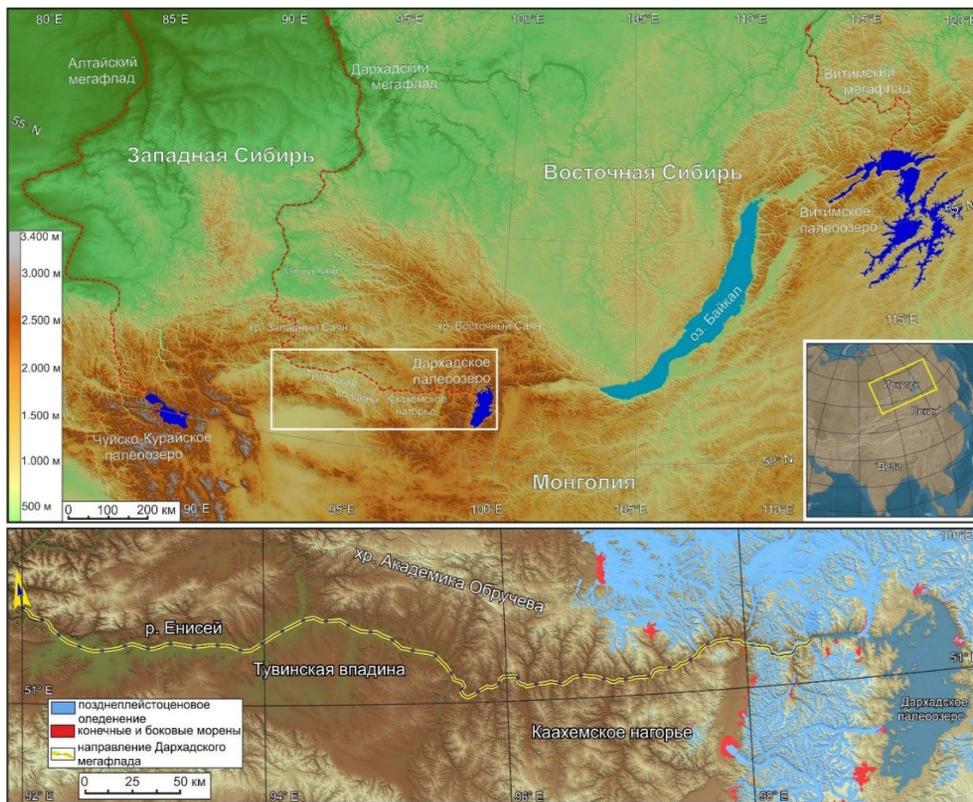
<sup>#</sup> Ссылка для цитирования: Аржанников С.Г., Аржанникова А.В., Броше Р. (2024). Дархадское палеоозеро и дархадские гляциальные суперпаводки в контексте катафлювиальных событий Северной Азии в позднем плейстоцене *Геоморфология и палеогеография*. Т. 55. № 4. С. 78–110. <https://doi.org/10.31857/S2949178924040069>; <https://elibrary.ru/FGTNSC>

мегафладов (megafloods). Расход воды в некоторых случаях оценивается в миллионы м<sup>3</sup>/с (O'Connor and Costa, 2004; Baker et al., 1993; Komatsu et al., 2009), а глубина потоков могла достигать 400–500 м (Rudoy, 2002). Распространяясь на большие территории, они воздействовали на ландшафты и принимали активное участие в формировании рельефа. Иногда суперпаводки перемещали столь огромные массы воды, что теоретически могли влиять на климат в планетарном масштабе (Clark et al., 2001; Kleiven et al., 2008). Сброс воды из ледниково-подпрудных озер стал причиной образования специфичных форм рельефа эрозионного и аккумулятивного генезиса (Baker, 1973; Baker et al., 1985, 1993; Martini et al., 2002; Komatsu et al., 2009; Margold et al., 2018; Benito, Thorndycraft, 2020). Среди эрозионных форм рельефа выделяются: каньоны, водоворотные котлы, водопады, висячие долины и долины прорыва – спиллвеи. К аккумулятивному рельефу относятся гигантская рябь течения, огромные аккумулятивные гряды – бары, прирусловые валы и покровы, сложенные отложениями заплесков.

На сегодняшний день известны три крупных палеоозера, ответственных за образование гляциальных суперпаводков в горах Южной Си-

бири (рис. 1). Это Чуйско-Курайское на Алтае (Rudoy, Baker, 1993; Baker et al., 1993; Rudoy, 2002; Зольников, Мистрюков, 2008; Зольников, Деев, 2013; Бричева и др., 2023; Зольников и др., 2023а, 2023б), Дархадское в Северной Монголии (Взаимодействие... 1987; Krivonogov et al., 2005; Gillespie et al., 2008; Komatsu et al., 2009; Batbaatar, Gillespie, 2016; Arzhannikov et al., 2023) и Витимское в Забайкалье (Еникеев, 2009; Margold et al., 2018). Изучение комплекса эрозионно-аккумулятивных форм позволило определить условия формирования озер, их размеры, расходы воды прорывных паводков и продолжительность разгрузки, периодичность прорывов и, частично, возраст.

Эрозионно-аккумулятивный комплекс, сформированный при гляциальном суперпаводке при разгрузке Дархадского палеоозера, наиболее полно представлен в долине р. Енисей (Шишхид-Гол, Кызыл-Хем, Каа-Хем, Улг-Хем, а также в долине р. Бий-Хем) в Северной Монголии, Республике Тыва, Республике Хакасия и на юге Красноярского края (Южная Сибирь) (Komatsu et al., 2009; Аржанникова и др., 2014; Komatsu et al., 2016; Зольников и др., 2021; Arzhannikov et al., 2023). Ряд статей посвящен изучению Дархадского палеоозера, условиям его образования и возра-



**Рис. 1.** Местоположение трех крупнейших палеоозер (Чуйско-Курайское, Дархадское, Витимское) и связанных с ними гляциальных суперпаводков Восточной Сибири: Алтайский, Дархадский и Витимский.

**Fig. 1.** Location of the three largest paleolakes (Chuya-Kurai, Darhad, Vitim) and the associated megafloods of Eastern Siberia: Altai, Darhad and Vitim.

сту (Krivonogov et al., 2005; Gillespie et al., 2008; Krivonogov et al., 2012; Batbaatar, Gillespie, 2016 a, b). Также затронуты вопросы распространения ПГРТ и других форм рельефа в долине р. Енисей (Каа-Хем, Улуг-Хем и Бий-Хем) (Komatsu et al., 2009; Аржанникова и др., 2014). На основе моделирования были определены параметры расхода воды Дархадского палеозера (Komatsu et al., 2009). Что касается времени формирования Дархадского суперпагодка, то детальных исследований не проводилось. Были попытки определить возраст Дархадского события по комплексу геологических данных (Аржанникова и др., 2014) с привлечением датировок по экспонированному возрасту ледниковых отложений в Дархадской впадине (Gillespie et al., 2008).

Данное исследование мотивировано наличием значительных пробелов в определении возраста события и понимании параметров ледникового подпора. Оно включает дистанционное зондирование, геоморфологическое картирование, изучение разрезов и космогенное ( $^{10}\text{Be}$ ) датирование экспонированных поверхностей. В работе использованы данные цифровых моделей рельефа SRTM, Tandem-X, данные геологической съемки СССР масштаба 1:200 000 (Геологическая карта... 1964), топографические карты масштаба 1:100 000, космоснимки, доступные в сети Интернет (Google Earth).

### 1.1. Краткая история изучения палеозер в Дархадской впадине

Наличие лимнических осадков и озерных береговых линий на территории северной и северо-западной Монголии свидетельствует о широком распространении крупных озер в четвертичное время (Селиванов, 1967; Спиркин, 1970; Аржанников, Аржанникова, 2011; Stolz et al., 2012). По генетическому типу они делятся на бессточные, транзитные и подпорные. Наиболее крупным из них было ледниково-подпрудное Дархадское палеозеро (рис. 1). Свое название оно получило по названию впадины, в которой оно располагалось. Дархадская впадина на протяжении плиоцена и плейстоцена неоднократно затоплялась водами подпрудных палеозер (Селиванов, 1968; Спиркин, 1970; Уфлянд и др., 1971; Гросвальд, Рудой, 1996; Krivonogov et al., 2005; Gillespie et al., 2008; Komatsu et al., 2009; Krivonogov et al., 2012). Морфология впадины, высоты горного обрамления более 3000 м и единственный сток через р. Шишхид-Гол являются максимально благоприятными условиями для формирования озерного бассейна подпрудного генезиса. По мнению Е.И. Селиванова (1968), существовало три этапа формирования палеозера. Два ранних связаны с излияниями лав,

последний — с подпором Тэнгисийнгольским ледником. Возможный возраст озер указан только для последнего как ранне-среднечетвертичный.

А.И. Спиркин (1970), также выделил три этапа развития озер во впадине: 1) плиоцен-раннечетвертичный; 2) позднечетвертичный — межледниковый; 3) позднечетвертичный — ледниковый. Согласно работам (Спиркин, 1970; Уфлянд и др., 1969), Дархадская впадина заложилась в доплиоценовое время (все датировки основываются на палинологическом анализе) или в конце миоцена — начале плиоцена. В этот период произошло поднятие горной цепи, расположенной к западу от Дархадской впадины. В результате тектонического подпора долины р. Шишхид-Гол сформировалось озеро небольших размеров, после чего произошло врезание реки в пределах поднявшегося блока, спуск озера и формирование основных элементов долины. А.И. Спиркин (1970) отмечал, что в межледниковую эпоху позднего плейстоцена долина р. Шишхид-Гол была залита молодыми базальтами, что явилось причиной образования озера. Вопрос подпора р. Шишхид-Гол вулканитами рассматривался и в других работах (Krivonogov et al., 2012). Однако прямое датирование базальтов  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  методом, показало возраст 6–4 млн л. (Перепелов и др., 2017; Цыпукова и др., 2022), что исключает четвертичный возраст палеозера, где подпором могли быть лавовые потоки, как это предполагали (Спиркин, 1970; Уфлянд и др., 1971).

Максимального уровня озеро достигало во время последней фазы позднеплейстоценового оледенения в связи с подпором реки Шишхид-Гол ледником, выдвинувшемся из долины р. Тэнгисийн-Гол. Высота зеркала озера доходила до уровня 1700–1720 м над у. м. (Спиркин, 1970). Дальнейшие детальные исследования оледенения в Восточном Саяне и Северной Монголии значительно скорректировали условия и возраст выдвигания ледников в позднем плейстоцене (Gillespie et al., 2008; Arzhannikov et al., 2012), однако привели к дискуссии о времени формирования ледниково-подпрудного озера в Дархадской впадине (Krivonogov et al., 2005; Gillespie et al., 2008; Komatsu et al., 2009; Batbaatar et al., 2016a, 2016b).

### 1.2. Ледниково-подпрудное Дархадское палеозеро: геоморфологические признаки выделения и происхождения

Исследователи, изучавшие четвертичную историю Дархадской впадины, отмечали широкое распространение и хорошую сохранность древних озерных береговых линий (Селиванов, 1967; Уфлянд и др., 1969; Спиркин, 1970; Взаимодействие... 1987; Гросвальд, Рудой, 1996; Krivonogov et al., 2005; Gillespie et al., 2008; Komatsu et al.,



Gillespie et al., 2008; Komatsu et al., 2009; Batbaatar, Gillespie, 2016 a, b; Komatsu et al., 2016).

### 1.3. История открытия и исследования Дархадского суперпаводка

В процессе изучения оледенения и ледникового рельефа в Саяно-Тувинском нагорье были обнаружены площадные формы рельефа, напоминающие рябь течения, только гигантских размеров. Б.А. Борисов и Е.А. Минина (1982) охарактеризовали их как ребристые и сетчато-ячеистые основные морены, являющиеся элементом среднеплейстоценового оледенения. Однако появление публикаций об аналогичных формах рельефа на Алтае, интерпретированных как следы крупных гидросферных катастроф (Барышников, 1979; Бутвиловский, 1982, 1985; Рудой, 1984), инициировало их поиск в других горных районах Южной Сибири.

Первым кто предположил, что комплекс аккумулятивно-эрозионных форм в долине р. Енисей (Кызыл-Хем, Каа-Хем и Улуг-Хем) является результатом сброса воды из Дархадского палеозера, был М.Г. Гросвальд (Взаимодействие... 1987). Сопоставив комплекс данных о существовании палеозера в Дархадской впадине в ледниковое время, наличии гигантского каньона (кули), выработанного в вулканических лавах в долине р. Каа-Хем, и системы ГРТ, он пришел к выводу об имевшем место в прошлом суперпаводке.

Дархадский феномен привлек внимание мирового научного сообщества, в связи с чем были проведены различные научные исследования, полевые конференции и опубликованы работы, посвященные морфологии рельефа, динамике и скорости разгрузки потока, моделированию потока, палеогеографической реконструкции и др. (Взаимодействие... 1987; Гросвальд, Рудой, 1996; Krivonogov et al., 2005; Gillespie et al., 2008; Komatsu et al., 2009; Arzhannikova et al., 2014; Batbaatar, Gillespie, 2016 a, b; Komatsu et al., 2016). В то же время возраст Дархадского суперпаводка определен не был, а механизм ледникового подпора в устье р. Тэнгисийн-Гол был недостаточно прояснен предыдущими исследованиями.

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### 2.1 Картирование

Создание карт и схем на территорию исследования базировалось на анализе данных дистанционного зондирования (цифровых моделей рельефа: SRTM V4, ALOS, TanDEM-X; топографических карт, космоснимков и аэрофотоснимков различного масштаба) и опубликованных данных (Krivonogov et al., 2005; Gillespie et al., 2008; Komatsu et al., 2009; Batbaatar, Gillespie, 2016 a, b; Komatsu et al., 2016).

Дешифрирование и анализ проводились на территорию долины р. Енисей (Шишхид-Гол, Кызыл-Хем, Каа-Хем, Улуг-Хем и Бий-Хем) и прилегающую территорию от Дархадской впадины до хр. Западный Саян. В первую очередь внимание уделялось комплексу озерных террас, расположенных в Дархадской впадине и в долине р. Шишхид-Гол, и комплексу ледниковых форм рельефа в долине р. Шишхид-Гол. Для получения первичной информации о параметрах Дархадского суперпаводка были детально проанализированы террасовые комплексы в долинах рек Каа-Хем, Улуг-Хем и Бий-Хем. Особое внимание было уделено формам рельефа, образование которых происходило в зоне динамического влияния гляциального суперпаводка. К ним относятся Каахемский каньон и ПГРТ в Тувинской и Дархадской впадинах.

Построение карт и схем происходило следующим образом. Первичный анализ проводился на основе данных SRTM (разрешение 90 м). Далее привлекались данные ALOS (30 м) и данные TanDEM-X (12 м). Для детализации мы использовали космоснимки различного разрешения, которые накладывались на рельеф для получения качественного трехмерного изображения, предоставляющего возможность детального анализа элементов эрозионного и аккумулятивного рельефа. Для исключения форм рельефа, связанных с литологическим фактором (например, линейных уступов на склонах долины) мы использовали геологические карты (Геологическая карта... 1964), привязанные к текущей системе координат. Также геологические карты дали информацию о границах распространения четвертичных отложений, что было важно при интерпретации распространения осадков Дархадского суперпаводка.

Топографические карты, привязанные к единой системе координат, являлись источником информации о топонимике основных элементов рельефа исследуемой территории, а также основой для коррекции абс. высот цифровых моделей рельефа (SRTM, ALOS, TanDEM-X).

### 2.2. Космогенное датирование ( $^{10}\text{Be}$ ) экспонированных поверхностей

Для определения возраста экспонированных поверхностей валунов, расположенных в пределах ПГРТ, нами использовался метод космогенного датирования по  $^{10}\text{Be}$  (Wagner, 1998; Stone, 2000; Gosse, Phillips, 2001). Датирование проводилось в Европейском центре исследований и преподавания в области геонаук об окружающей среде (CEREGE, CNRS), Франция.

Скорость образования  $^{10}\text{Be}$  под действием космических лучей в реакциях расщепления ядер кислорода и кремния в поверхностных слоях горных

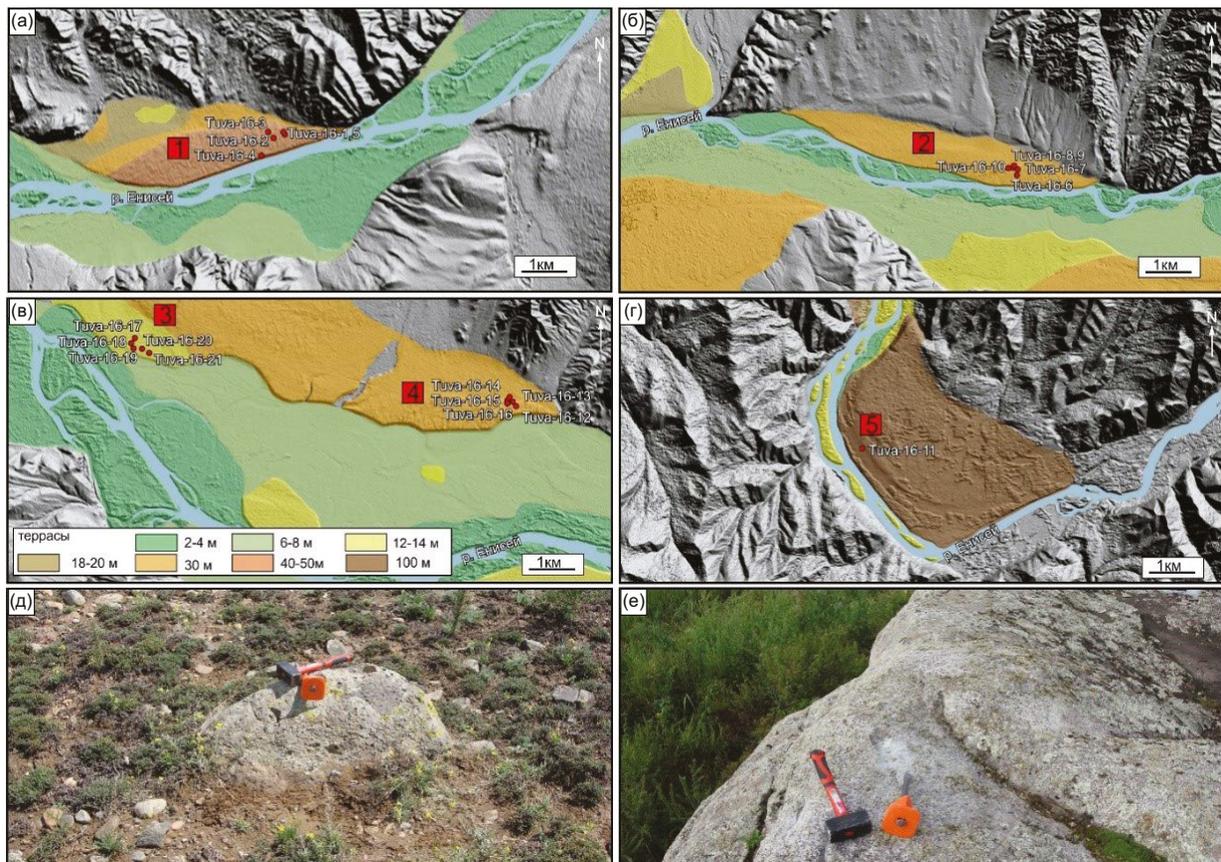
пород намного ниже, чем скорость образования бериллия в атмосфере. Но, в отличие от атмосферного  $^{10}\text{Be}$ , переносимого и сорбируемого в почвах и осадках, *in situ*  $^{10}\text{Be}$  не участвует в экзогенном цикле. Он образуется в силикатных минералах, в особенности в кварце и, следовательно, подходит для датирования экспонированных поверхностей. Кварц образует геохимически закрытую систему, и, таким образом, космогенный  $^{10}\text{Be}$  не загрязняется примесью атмосферного  $^{10}\text{Be}$ . Период полураспада  $^{10}\text{Be}$  составляет 1.387 млн. л. (Chmeleff et al., 2010; Korchinek et al., 2010), что позволяет датировать поверхностные породы в широком временном диапазоне.

Одним из основных условий получения надежных результатов при использовании бериллиевого метода является неподвижность датированного валуна с момента его экспозиции. В изучаемом случае время стабилизации датированного объекта совпадает со временем окончания суперпаводка, и его местоположение (ориентация в пространстве) должно сохраняться до момента отбора образца.

### 2.3. Отбор образцов на космогенное датирование ( $^{10}\text{Be}$ )

При отборе образцов были выбраны четыре ПГРТ, расположенных в долине р. Енисей (Каа-Хем, Улуг-Хем) на протяжении 150 километров (рис. 3). Для привязки ПГРТ в пространстве приведены координаты их центров. Географическая привязка места отбора образцов производилась с помощью портативного GPS приемника (ошибка  $\pm 5$  м). Для каждого образца была измерена топографическая тень.

ПГРТ № 1 ( $51^{\circ}33.883' \text{N}$ ;  $93^{\circ}59.016' \text{E}$ ) (рис. 3, (а)) овальной формы расположено на правом берегу р. Улуг-Хем в 30 км ниже по течению от г. Кызыл и составляет  $8 \times 2$  км. Галечно-валунные отложения залегают на нескольких уровнях сохранившихся террас общей площадью  $11.5 \text{ км}^2$ . Максимальная высота над урезом воды составляет 30–40 м, минимальная 14–16 м. Непрерывный переход элементов ГРТ с высокого уровня на более низкий, свидетельствует об одновременном их формировании. Наличие в тыловой части террасы, в области



**Рис. 3.** Уровни террас, гигантской ряби течения и баров. Фон – цифровая модель рельефа TanDEM-X. Красными точками показано местоположение образцов, взятых на космогенное ( $^{10}\text{Be}$ ) датирование (а, б, в, г). Примеры валунов, с которых отбирались образцы (д, е).

**Fig. 3.** Levels of terraces, giant current ripples and bars. On the background is the TanDEM-X. Red dots show the location of samples taken for cosmogenic ( $^{10}\text{Be}$ ) dating (a, б, в, г). Examples of boulders from which the samples were taken (д, е).

контакта со склоном, значительного понижения и его отсутствие в изголовье дюны, свидетельствует о возможном существовании в прошлом уровня террасы высотой 10–12 м, погребенного в процессе Дархадского суперпаводка. В продольном и поперечном профилях выделяется валообразная структура. На поверхности преобладают валы высотой 1–2 м с увеличением их к центральной части до 6–8 м. На восточной оконечности 35 м террасы с поверхности валунов были взяты 5 образцов (Tuva-16-1,2,3,4,5).

*ПГРТ № 2* (51°43.101'N; 94°33.670'E) (рис. 3, (б)) расположено на правом берегу р. Каа-Хем, напротив одноименного поселка. Имеется два уровня галечно-валунных отложений – 35 и 70 м. Общая площадь составляет 12 км<sup>2</sup>. Высота валов в среднем составляет 2–4 м, редко 4–6 м. На поверхности повсеместно встречается большое количество валунов размерами до 1 м, а в некоторых местах – 2–4 м. В восточной части 35 м террасы с поверхности валунов были взяты 5 образцов (Tuva-16-6, 7, 8, 9, 10).

*ПГРТ № 3* (51°40.020'N; 94°53.032'E) (рис. 3, (в)). Точки отбора образцов расположены к северо-западу в 0.3–0.7 км от пос. Суг-Бажи. Поле отбора образцов представляет собой систему валов высотой 0.5–0.7 м, расположенную на высоте 14 м над современным уровнем воды в р. Каа-Хем. С этого уровня были взяты 5 образцов (Tuva-16-17, 18, 19, 20, 21).

*ПГРТ № 4* (51°39.201'N; 94°56.620'E) (рис. 3, (в)). Это есть одно из наиболее крупных сохранившихся фрагментов ПГРТ в долине р. Каа-Хем. Оно расположено на правом берегу реки в 3 км к западу от пос. Бурен-Хем. Его площадь составляет более 20 км<sup>2</sup>. ГРТ расположена на трех уровнях 14, 30–40 и 70 м относительно уреза воды в реке. Серия образцов (Tuva-16-12, 13, 14, 15, 16) была взята с поверхности 30-метровой террасы.

*Бар* (51°18.397'N; 95°44.375'E) (рис. 3, (д)). Один образец, представляющий большой интерес, отобран на гигантском баре, на правом берегу р. Каа-Хем, в западной части Каахемского нагорья, в 2.3 км западнее пос. Бельбей. Образец (Tuva-16-11) был взят с гранитного валуна, размеры которого составляют 8 × 4 м и высота 2–2.5 м. Масса валуна составляет около 172 т. Точка отбора образца расположена на террасовидной площадке. Превышение над современным уровнем воды в реке составляет 25 м. Размеры гранитного валуна свидетельствуют о значительной мощности потока, так как ближайшее коренное залегание гранитов расположено в 15 км выше по течению.

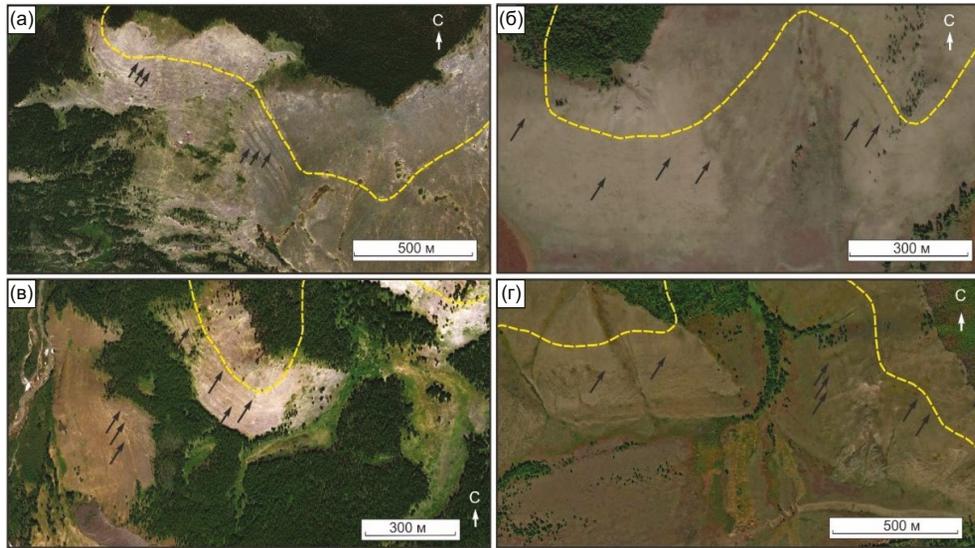
Таким образом, нами был взят 21 образец с поверхности валунов в пределах четырех ПГРТ на

высотах 12–14 м, 30 м, 40–50 м и с поверхности 25-метровой террасы в пределах гигантского бара.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

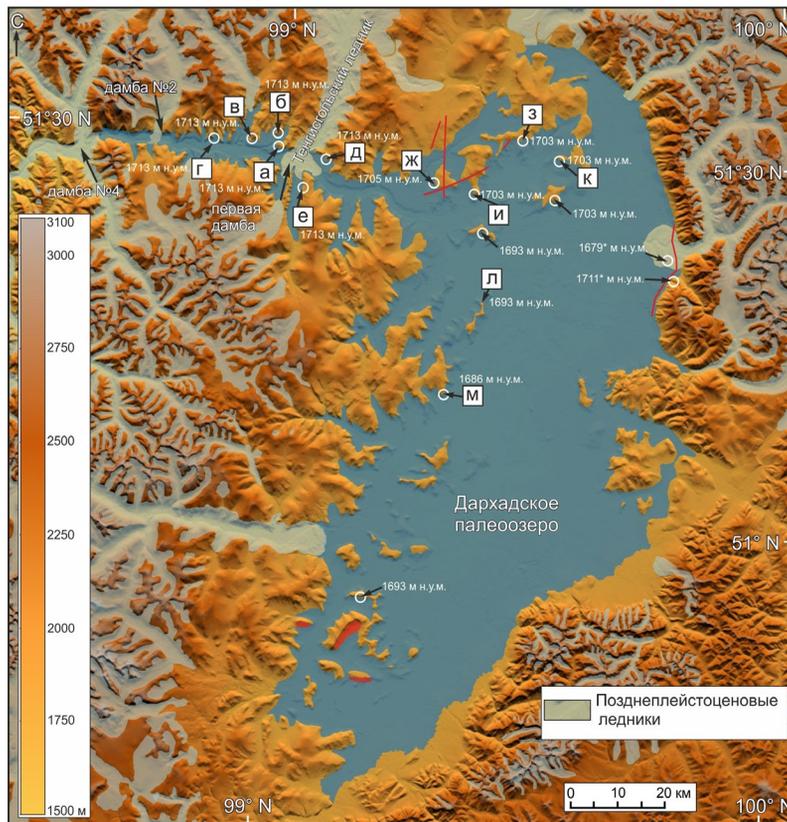
#### 3.1. Уровень Дархадского палеозера по данным дешифрирования космических снимков

Анализ береговых линий Дархадского палеозера на основе дешифрирования космических снимков и данных SRTM, показал, что наиболее высокая из них соответствует высоте 1713 м над у. м. Она фиксируется на северо-западном участке склона хребта, ограничивающего Дархадскую впадину, и в долине р. Шишхид-Гол. Наиболее интересным результатом дистанционного зондирования на территорию долины р. Шишхид-Гол является наличие абразионных линий палеозера ниже устья р. Тенгисийн-Гол, т.е. ниже ледникового подпора. Они хорошо читаются на склонах долины до абс. высоты 1713 м. Например, на правом борту долины р. Шишхид-Гол на протяжении 12 км ниже устья р. Тенгисийн-Гол отчетливо видны озерные террасы, опоясывающие склоны основной долины и частично расположенные на склонах долин боковых притоков (рис. 4, 5). Имеются несколько сохранившихся фрагментов, начиная от устья р. Тенгисийн-Гол вниз по долине р. Шишхид-Гол (рис. 4, (а–г)). Каждая протяженная береговая линия, видимая на космоснимке, соответствует изолинии с характерной для нее высотой, определенной по данным SRTM, ALOS и уточненной по данным топографических карт СССР. Фрагмент I (рис. 4, (а)) расположен в 2.2 км ниже устья р. Тенгисийн-Гол (рис. 5, (а)). Склон долины террасирован на расстоянии 1.2 км между 1680 и 1713 м над у. м. Фрагмент II (рис. 4, (б)) расположен в долине правого бокового притока р. Шишхид-Гол (рис. 5, (б)). На одном из мысов, образованных основной долиной и притоком, видна серия береговых линий протяженностью 1.4 км. Линии читаются, начиная с 1640 до 1713 м над у. м. Фрагмент III (рис. 4, (в)) расположен ниже по течению в 7 км от устья р. Тенгисийн-Гол (рис. 5, (в)). На склоне западной экспозиции на двух уровнях отчетливо видны террасовые уровни палеозера, протяженностью 0.7 км. Они сосредоточены между 1550 и 1713 м над у. м. Фрагмент IV (рис. 4, (г)) расположен в 12 км ниже по течению от устья р. Тенгисийн-Гол (рис. 5, (г)). На склоне правого притока в его устьевой части хорошо видна серия параллельных береговых линий длиной 1 км, расположенная между 1520 и 1713 м над у. м. Также хорошо читается абрадируемый склон протяженностью 1.2 км ниже по течению от устья этого притока (рис. 4, (г)).



**Рис. 4.** Положение серии древних береговых линий (черные стрелки), фиксирующих уровень палеоозера ниже устья р. Тенгисийн-Гол. Фон – космические снимки Google Earth. Желтым пунктиром показана изолиния 1713 м над у. м. Все космоснимки относятся к правому борту долины р. Шишхид-Гол.

**Fig. 4.** Position of a series of ancient coastlines (black arrows) that record the level of the paleolake below of the Tengisiin-Gol mouth. On the background are Google Earth satellite images. The yellow dotted line indicates the 1713 m asl contour line. All satellite images show the right side of the Shishkhid-Gol valley.



**Рис. 5.** Обзорная схема позднечетвертичного оледенения горного обрамления Дархадской впадины и местоположение ключевых точек исследования в пределах Дархадского палеоозера и долины р. Шишхид-Гол, обсуждаемых в тексте. Для построения схемы были использованы данные SRTM V4.

**Fig. 5.** Overview map of the Late Quaternary glaciation of the mountain frame of the Darhad Basin and the location of key research points within the Darhad paleolake and the Shishkhid-Gol valley, discussed in the text. SRTM V4 data was used to produce the map.

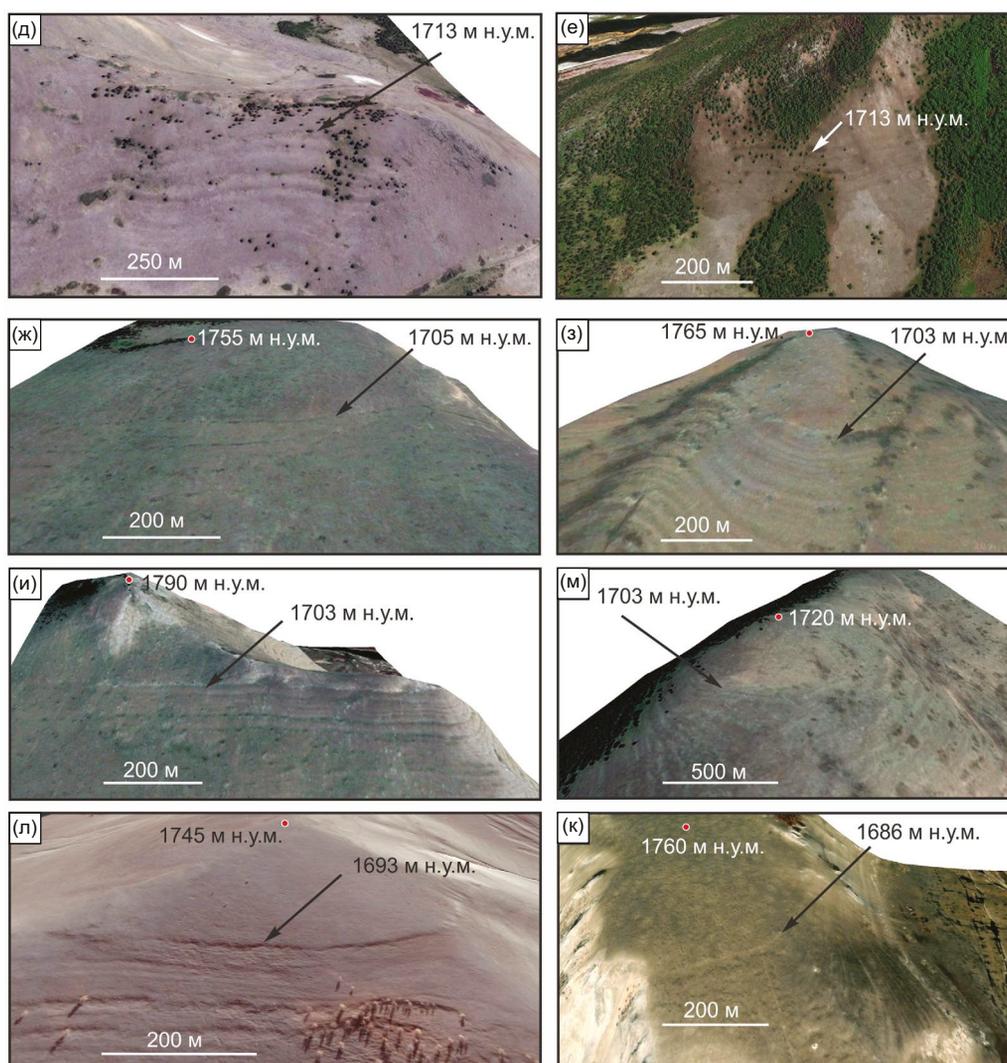
Следы абразионной деятельности палеоозера расположены не только на бортах долины р. Шишхид-Гол, но дешифрируются и на склонах боковых притоков. Они хорошо читаются в долине р. Их-Сариг-Гол (левый приток), в районе левобережной Тайрисингольской конечной морены, где имеется фрагмент моренной дамбы (рис. 5, (е)). Это указывает на то, что высота Тайрисингольского ледника не доходила до абс. высоты 1713 м над у. м. в долине р. Шишхид-Гол. Это позволило сформироваться заливу палеоозера в долине р. Их-Сариг-Гол, которое отмечено на схеме (Krivonogov et al., 2005), но отсутствует на схеме в работе (Gillespie et al., 2008).

В Дархадской впадине, в прибортовых частях и во внутренней области, расположены небольшие хребты и отдельные вершины. В период суще-

ствования палеоозера они были полуостровами и островами. В этот период при изменении уровня воды на их склонах формировались береговые валы и террасы.

Анализ космоснимков и радарных данных показал, что максимально высокая береговая линия палеоозера, не постоянна по высоте и изменяется от 1713 м над у. м. до 1686 м над у. м. (рис. 5, 6). Например, на южных склонах небольшого хребта, расположенного к северу от озер Доод-Нур и Тарган-Нур, максимально высокие береговые озерные линии прослеживаются на высоте около 1705–1703 м над у. м. (рис. 5, 6 (ж–к)). К юго-западу верхняя береговая линия имеет абс. высоту 1693 м, а еще южнее 1686 м (рис. 5, 6 (л, м)).

Таким образом, дифференциация по высоте верхней береговой линии палеоозера свидетель-



**Рис. 6.** Древние озерные береговые линии на космических снимках (Google Earth). Местоположение каждого снимка см. на рис. 5. Для верхней береговой линии дана высотная характеристика в абс. значениях. Приведенные данные указывают на интенсивные тектонические деформации озерных террас.

**Fig. 6.** Satellite images (Google Earth) show paleo shoreline. See Fig. 5 for the location of each image. The altitudes are shown for the highest coastlines. The presented data indicate intense tectonic deformations of the lake terraces.

ствует о значительных тектонических опусканиях в пределах Дархадской впадины, произошедших за период с момента ее осушения.

### 3.2. Тектонические деформации

Дархадская впадина является составным сегментом юго-западного замыкания Байкальской рифтовой зоны и характеризуется широтным растяжением. С востока и запада впадина контролируется разломами со сбросовой кинематикой. Толщина осадочного чехла составляет 300–400 м (Сейсмотектоника и сейсмичность... 1993). Анализ космоснимков и цифровой модели рельефа позволил выделить сейсмогенные разрывы и гравитационные смещения в пределах акватории Дархадско-

го палеоозера (рис. 5, 7). Активизация разломов происходила как в период существования озера, так и после его спуска.

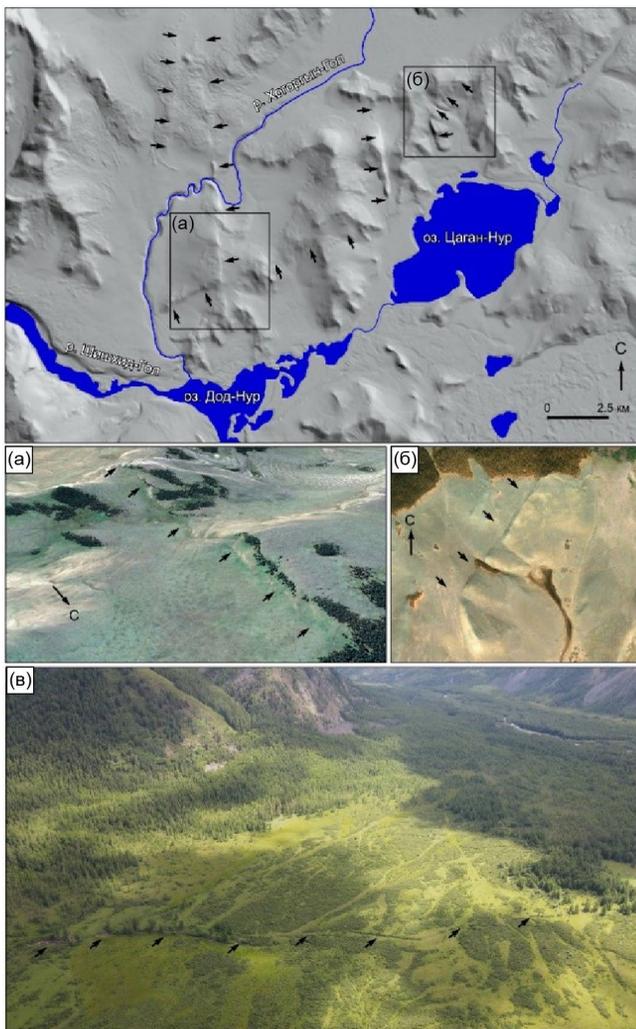
В северной части Дархадской впадины выявлен сбросовый разлом меридионального простирания с амплитудой смещения от 25 м на юге до 60 м на севере. Смещение по разлому привело к частичному опусканию и погребению долины реки Хогоргын-Гол (рис. 7, (а)). Широтный сбросовый разлом с амплитудой смещения около 50 м расположен к северу от озера Доод-Цаган-Нур. Он протягивается от долины р. Хогоргын-Гол, пересекает южную часть меридионального разлома и заканчивается в районе озера Тарган-Нур (рис. 7). Еще один комплекс деформаций расположен к востоку от вышеописанных и представлен уступом северо-восточного простирания на южном склоне небольшого хребта (рис. 7, (б)).

Выявленные сейсмогенные нарушения в восточной части Дархадской впадины (рис. 5, 7, (в)) в районе Джарагольской конечной морены (Сейсмотектоника и сейсмичность... 1993; Arzhannikova et al., 2024) свидетельствуют о продолжающихся активных тектонических движениях в этом районе. Сейсмогенные нарушения с максимальной амплитудой 8 м смещают пролювиальные, колювиальные и ледниковые отложения. Видимая на поверхности протяженность разлома составляет 13 км.

### 3.3. Контуры ледниковой дамбы в устье р. Тэнгис-Гол

Основными элементами рельефа, позволяющими реконструировать размеры ледника, являются конечная и боковая морены, спиллвеи и маргинальные каналы. Абсолютная высота левой (1715–1737 м) и правой (1720–1745 м) боковых морен, расположенных в предустьевой части р. Тенгисийн-Гол, и абс. высота тальвега спиллвеев (1700–1740 м) дают основание предполагать возможность формирования подпора в долине р. Шишхид-Гол Тенгисийнгольским ледником (Krivonogov et al., 2005; Gillespie et al., 2008; Komatsu et al., 2009; Batbaatar, Gillespie, 2016a, 2016b; Komatsu et al., 2016). Об этом также свидетельствует фрагмент Тенгисийнгольской конечной морены, расположенный на противоположной стороне р. Шишхид-Гол в устьях ее левых притоков. Здесь абс. высота морены составляет 1650 м. Исходя из наличия спиллвеев с различной абс. высотой в устьевой части р. Тенгисийн-Гол и возраста формирования одного из них (Gillespie et al., 2008), мы можем предположить существование двух уровней стояния Тенгисийнгольского ледника в МИС 2.

Уровень I определяется верхними спиллвеевыми (1700–1740 м над у. м.), фрагментами конечной

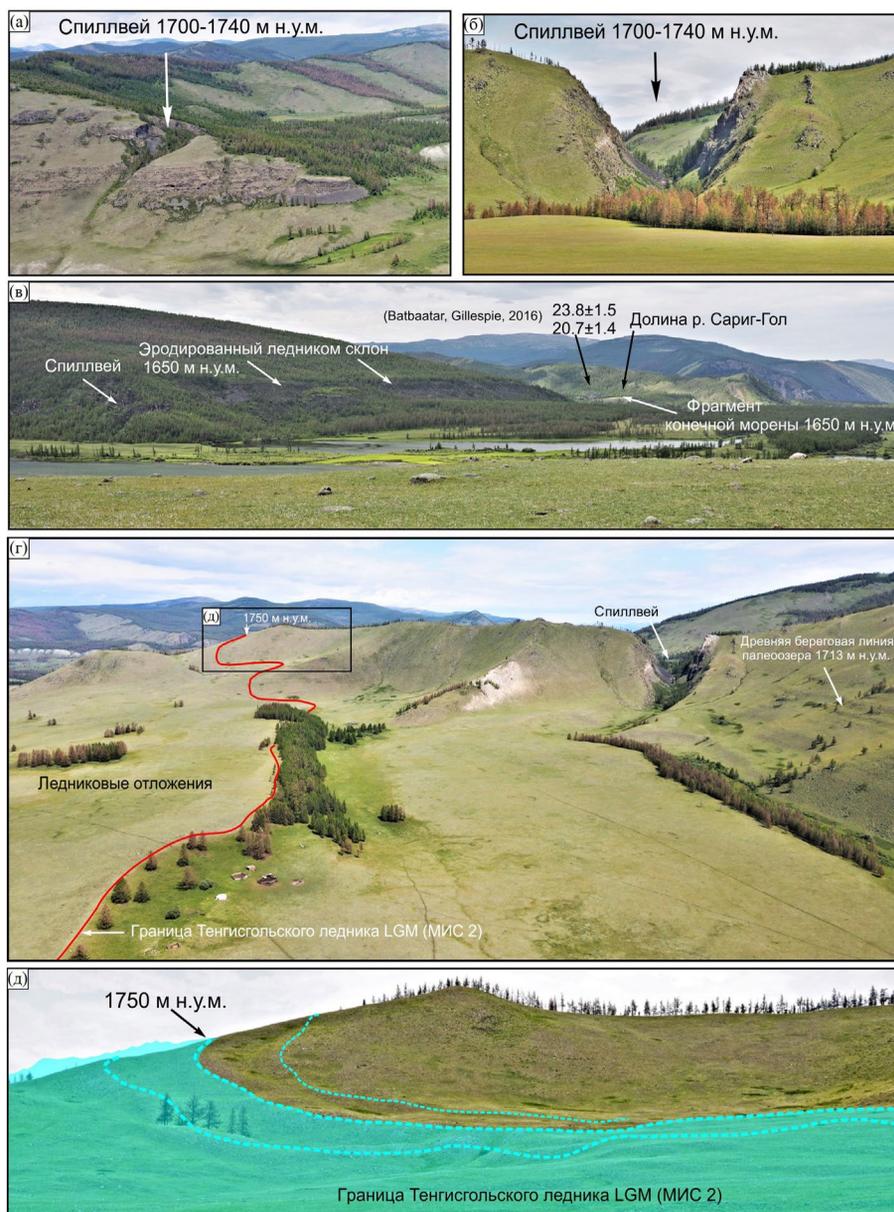


**Рис. 7.** Линии тектонических и сейсмогенных деформаций в северной и восточной частях Дархадской впадины. Фон — цифровая модель рельефа SRTM v4, космические снимки Google Earth (а, б), фотографии с воздуха (в).

**Fig. 7.** The digital elevation model (SRTM v4), satellite images (а, б) (Google Earth) and aerial photographs (в) show lines of tectonic and seismogenic deformations located in the northern and eastern parts of the Darhad Basin.

морены (1650 м над у. м.), абрадированным склоном, а также маргинальными каналами на правом и левом берегах р. Шишхид-Гол (рис. 8, (а–г)). Уровень I в устье р. Тенгисийн-Гол имел высоту 1750 м над у. м. и при выходе ледника в долину р. Шишхид-Гол понизился до 1650 м над у. м. (высота конечной морены, высота верхней части аб-

радированного склона и высота спиллвея на левом берегу р. Шишхид-Гол) (рис. 8, 9, профили АБ, ВГ). Экспонированный возраст валунов  $23.8 \pm 1.5$  тыс. л. и  $20.7 \pm 1.4$  тыс. л. из конечной морены в долине р. Сариг-Гол (Batbaatar, Gillespie, 2016b) характеризует выдвигание ледника в LGM (МИС 2). Реконструкция Тенгисийнгольского ледника на



**Рис. 8.** Реконструкция границы ледника в устье р. Тенгисийн-Гол, существовавшей в последний ледниковый максимум (МИС 2). (а) – спиллвей (эрозионный врез талых ледниковых вод), расположенный на правом берегу р. Тенгисийн-Гол; (б) – спиллвей, расположенный на левом берегу р. Тенгисийн-Гол; (в) – левый берег р. Шишхид-Гол (устье р. Их-Сариг-Гол) и элементы ледникового рельефа (абрадированный ледником склон и фрагмент конечной морены Тенгисийнгольского ледника); (г, д) – реконструкция уровня Тенгисийнгольского ледника (левый борт приустьевой части р. Тенгисийн-Гол) в первую фазу сартанского оледенения (LGM).

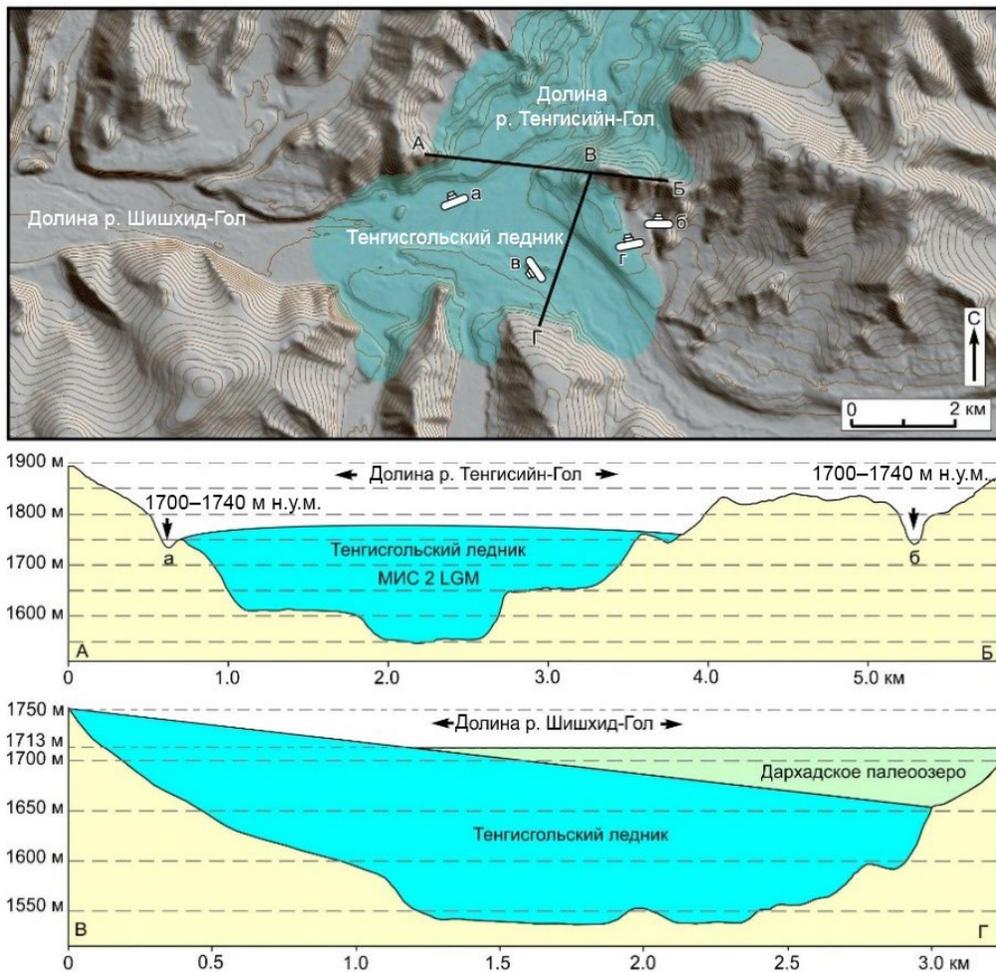
**Fig. 8.** Reconstruction of the glacier boundary at the mouth of the Tengisiin-Gol, which existed during the LGM (MIS 2). (a) – spillway (erosive incision of melted glacial waters), located on the right bank of the Tengisiin-Gol; (б) – spillway, located on the left bank of the Tengisiin-Gol; (в) – left bank of the Shishkhid-Gol (the mouth of the Ikh-Sarig-Gol river) and elements of glacial relief (a slope abraded by a glacier and a fragment of the terminal moraine of the Tengisiin-Gol glacier); (г, д) – reconstruction of the level of the Tengisiin-Gol glacier (the left side of the mouth of the Tengisiin-Gol) in the first phase of the Sarton glaciation (LGM).

профиле ВГ (рис. 9) показывает, что уровень I на левом берегу р. Шишхид-Гол был значительно ниже максимального наполнения (1713 м над у. м.) Дархадского палеоозера.

Уровень II реконструируется по нижнему спиллеву (1657 м над у. м.) в левой устьевой части р. Тенгисийн-Гол (рис. 10). Для канала стока имеется <sup>10</sup>Ве-дата экспонирования (рис. 10), попадающая в МИС 2 (Gillespie et al., 2008). На профилях АБ, ВГ (рис. 10) показана реконструкция ледникового уровня II свидетельствующая о его значительном снижении в устье р. Тенгисийн-Гол. Исходя из параметров двух уровней Тенгисийнгольского ледника, в пределах долины р. Шишхид-Гол (рис. 8, 9, 10) и распространения озерных террас ниже устья р. Тенгисийн-Гол (рис. 8), мы можем

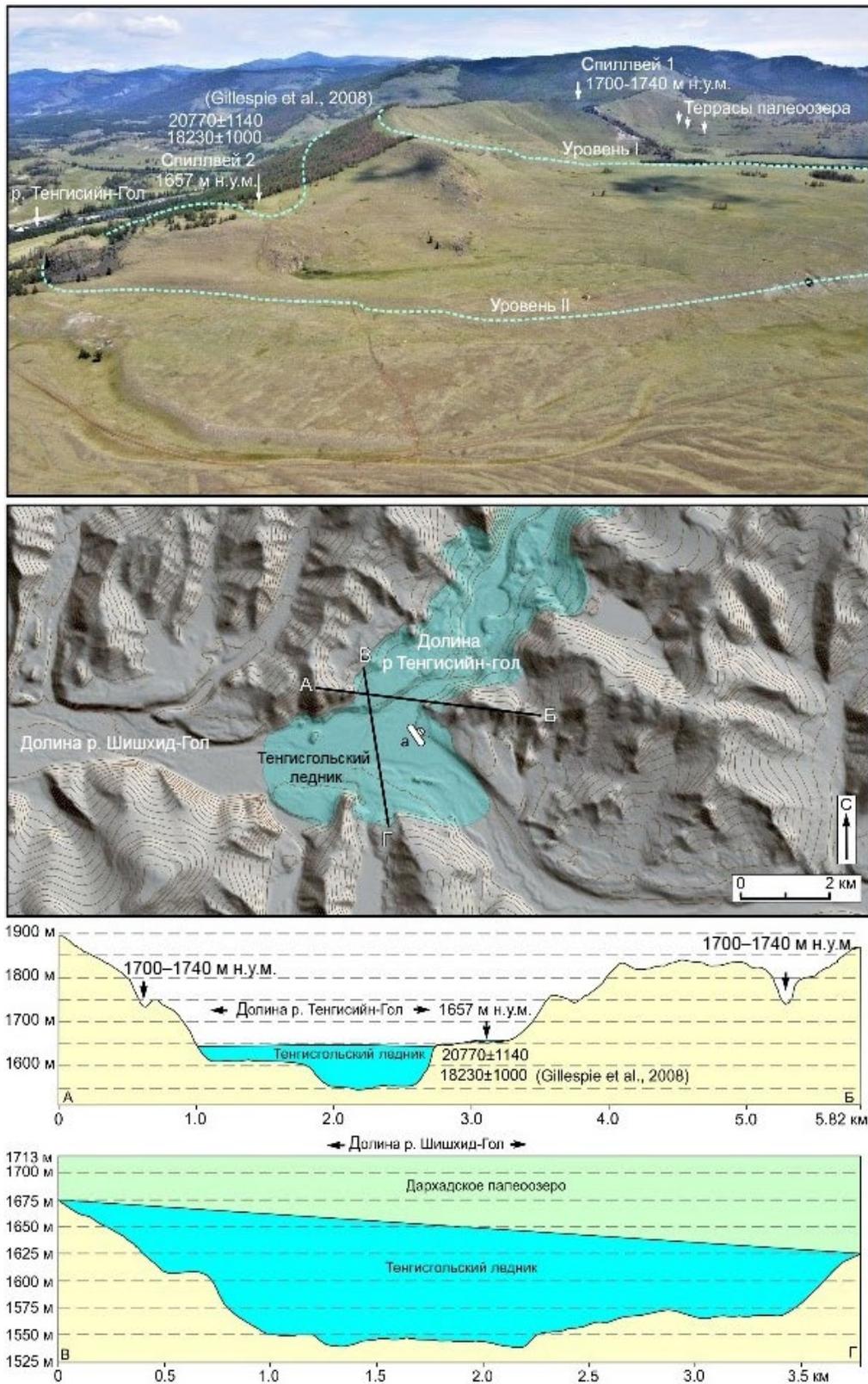
утверждать, что если Тэнгисингольский ледник и выполнял подпорную функцию на определенных этапах своего развития, то его уровень был гораздо ниже, чем максимальный уровень воды в Дархадском палеоозере.

В районе выхода Тенгисийнгольского ледника в долину р. Шишхид-Гол, на склонах левого борта р. Тенгисийн-Гол имеют широкое распространение террасы палеоозера. Их контуры отчетливо читаются в приводораздельной части и в створе долины, откуда выходил ледник. Это говорит о том, что подъем воды в палеоозере и формирование абразионных уровней происходили до того, как Тенгисийнгольский ледник вышел в долину р. Шишхид-Гол. Это указывает на существование в то время другого, основного подпора, располо-



**Рис. 9.** На цифровой модели рельефа символом фотоаппарата (а, б, в, г) показаны направления на локацию фотоснимков, расположенных на рис. 10 и простираение профилей АБ, ВГ. На профилях приведены параметры реконструированного Тенгисийнгольского ледника и отражена его роль в формировании подпора Дархадского палеоозера. На рисунке использованы данные SRTM v4 и космоснимки Google Earth.

**Fig. 9.** On the digital elevation model, the camera symbol (а, б, в, г) shows the directions to the location of the photographs located in Fig. 10 and the strike of profiles АБ, ВГ. The profiles show the parameters of the reconstructed Tengisyingol glacier and reflect its role in the formation of the backwater of the Darhad paleolake. The figure uses SRTM v4 data and Google Earth satellite images.



**Рис. 10.** Реконструкция ледникового подпора в устье р. Тенгисийн-Гол для периода 20–18 тыс. л. н. Профили показывают уровни ледника и поверхность Дархадского палеозера.

**Fig. 10.** Reconstruction of glacial backwater at the mouth of the Tengisiin-Gol for the period 20–18 ka. Profiles show glacier levels and the surface of the Darhad paleolake.

женного ниже устья р. Тенгисийн-Гол. В устье террасовые контуры не перекрыты сплошным чехлом моренных отложений, хотя на поверхности террас имеются крупные глыбы.

**3.4. Элементы ледникового рельефа и параметры ледниковой дамбы в устьях рек Хара-Бьярангийн-Гол и Их-Жамс-Гол**

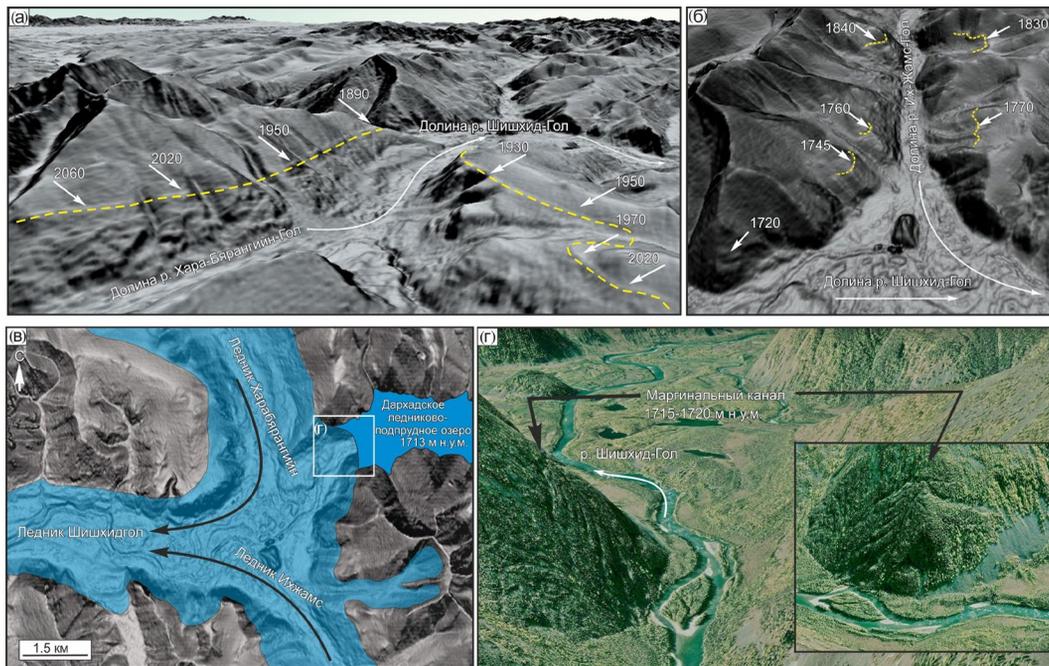
В результате дешифрирования космоснимков на район долины р. Шишхид-Гол, ниже устья р. Тенгисийн-Гол был обнаружен комплекс ледниковых отложений высокого уровня.

Река Хара-Бьярангийн-Гол является правым притоком р. Шишхид-Гол. Долина расположена в пределах горного массива с абс. высотами более 3000 м. Ледниковые цирки и трогии имеют широкое распространение в верховьях бассейна этой реки. На склонах долин имеются различные уровни боковых морен. В устьевой части реки расположена крупная конечная морена. Основными показателями толщины льда в долине являются боковые морены. Они хорошо дешифрируются как на космических снимках, так и на цифровой модели рельефа (ALOS). Абсолютная высота левой

боковой морены в долине р. Хара-Бьярангийн-Гол (в устьевой части) составляет 1890 м (рис. 11, (а)).

Река Их-Жамс-Гол является левым притоком р. Шишхид-Гол. Ледосборный бассейн расположен в пределах горного массива с абс. высотами 2700–3000 м. В бортах долины этой реки сохранились фрагменты боковых морен, дающие информацию о мощности ледника. Абсолютные высоты краевой части ледника в приустьевой части на левом и правом бортах составляют 1770 м и 1745 м соответственно (рис. 11, (б)).

Устья упомянутых притоков расположены друг напротив друга. Выходившие в долину р. Шишхид-Гол ледники, объединялись и формировали крупное тело ледниковой дамбы, уровень которой соответствовал 1715–1720 м над у. м. (рис. 11, (в)). Абсолютная высота ледникового подпора определяется по высоте канала стока талых вод (рис. 11, (г)) в левом борту р. Шишхид-Гол. Дополнительным свидетельством наличия ледниковой дамбы является серия эрозионных рытвин на склоне, фиксирующих нарастание высоты ледника в этой части долины р. Шишхид-Гол.



**Рис. 11.** Реконструкция ледников двух притоков р. Шишхид-Гол (Хара-Бьярангийн-Гол и Их-Жамс-Гол), формировавших ледниковый подпор Дархадского палеоозера. На цифровой модели рельефа (а, б) показаны долины рек Хара-Бьярангийн-Гол и Их-Жамс-Гол, соответственно. Цифрами указаны абс. высоты боковых морен. На врезке (в) показан район слияния ледников в долине р. Шишхид-Гол и формирования ледниковой дамбы. На космоснимке (г) показана серия маргинальных каналов, формировавшихся талыми водами вдоль края ледника.

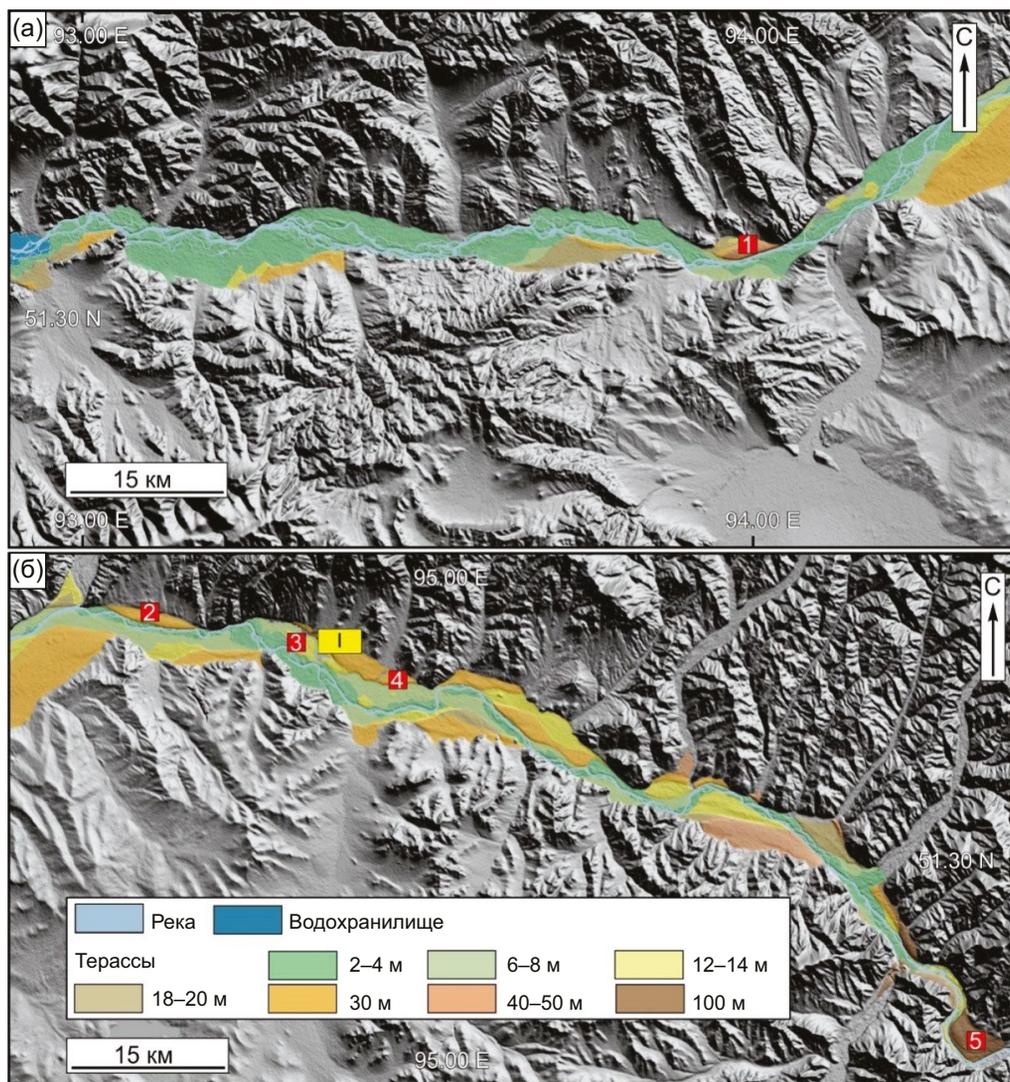
**Fig. 11.** Reconstruction of glaciers of two tributaries of the Shishkhid-Gol (Khara-Biyarangiin-Gol and Ikh-Zhams-Gol), which formed the glacial backwater of the Darhad paleolake. The digital elevation model (a, б) shows the valleys of the Khara-Biyarangiin-Gol and Ikh-Zhams-Gol rivers, respectively. The numbers indicate the altitude of the lateral moraines. The inset (в) shows the area of confluence of glaciers in the Shishkhid-Gol valley and the formation of a glacier dam. Satellite image (г) shows a series of melt water channels formed along the edge of the glacier.

### 3.5. Основные эрозионно-аккумулятивные формы рельефа долины р. Енисей (Кызыл-Хем, Каа-Хем) в пределах Каахемского нагорья и Тувинской впадины

#### 3.5.1. Каахемское нагорье

Отрезок реки Енисей (Кызыл-Хем, Каа-Хем) в пределах Каахемского нагорья представляет собой узкий каньон с крутыми или отвесными стенками высотой 200–400 м, сложенными лавами плейстоценового возраста (Сугоракова, 2003). В процессе одной из вулканических активизаций на терри-

тории Центральной Азии базальтовые потоки, формировавшиеся при трещинных излияниях в хребте Академика Обручева и Каахемском нагорье, заполнили речную долину и часть притоков на протяжении 170 км. Вероятно, что эрозионный врез в лавы и формирование каньона начались задолго до спуска Дархадского палеоозера, но основной вклад внес гляциальный суперпаводок (Взаимодействие... 1987). Имеются признаки быстрой эрозии в виде коренных останцов обтекания и висячих долин. В стенках каньона читаются



**Рис. 12.** Результаты дешифрирования данных TanDEM-X, свидетельствующие о характере аккумулятивно-эрозионной деятельности Дархадского суперпаводка в долине р. Енисей в Тувинской впадине (а, б). Красными квадратами показано пространственное положение точек отбора образцов на космогенное ( $^{10}\text{Be}$ ) датирование экспонированных валунов в пределах ГРТ. Желтым квадратом обозначено местоположение комплекса высоких эрозионных уровней, отражающих максимальный уровень Дархадского суперпаводка в Тувинской впадине (детали см. на рис. 18).

**Fig. 12.** Results of interpretation of TanDEM-X data, showing the nature of the accumulative-erosive activity of the Darhad megaflow in the Yenisei valley in the Tuva Basin (a, б). Red squares indicate the spatial location of sampling points for cosmogenic ( $^{10}\text{Be}$ ) dating of exposed boulders within the gravel dunes. The yellow square indicates the location of a complex of high erosion levels, reflecting the maximum level of the Darhad megaflow in the Tuva Basin (for details, see Fig. 18).

многочисленные препарированные лавовые потоки, формирующие полки и уступы, некоторые из которых имеют ширину более 200 м. Интенсивная эрозия и большая скорость течения потока привели к переносу базальтовых обломков на расстояние более 100 км от их коренного залегания. В настоящее время наряду с другими породами они участвуют в строении 20- и 30-метровых террас.

### **3.6. Террасовый комплекс в долине р. Енисей (Каа-Хем, Кызыл-Хем)**

#### *3.6.1. Тувинская впадина*

Тувинская впадина расположена между хребтами Западный Саян и Танну-Ола (см. рис. 1). Главной дренажной структурой впадины является р. Енисей с притоками. Анализ морфологии речной долины в пределах Тувинской впадины показал существование двух основных комплексов эрозионно-аккумулятивного рельефа, образованного в период Дархадского суперпаводка и после него (рис. 12). К основным элементам рельефа, сформированным после Дархадского суперпаводка, относятся низкая и высокая поймы (см. рис. 12, (а, б)), которые имеют особые черты, отличающие их от других эрозионно-аккумулятивных форм. Совокупность донной и боковой эрозии привели к образованию четко оформленных уступов террас, меандр и стариц. Сезонный подъем воды в реке в результате дождей и таяния снега приводит к переоформлению русла, отмиранию старых и рождению новых меандр и островов.

Во второй комплекс эрозионно-аккумулятивных форм рельефа в Тувинской впадине входят террасы, подвергшиеся значительной переработке в период прохождения Дархадского суперпаводка. Данный комплекс включает террасы высотой от 12 м и более и в значительной степени отличается от рельефа низкой и высокой пойм (рис. 12, (а, б)). Главной отличительной чертой является отсутствие меандр и наоборот наличие линейных структур на поверхностях террас, что свидетельствует о формировании данного рельефа в других динамических условиях. Основным элементом верхнего яруса эрозионно-аккумулятивного рельефа является система ГРТ.

Таким образом, характер речной долины в пределах Тувинской впадины предопределил широкое распространение и сохранность террас различного уровня. Часть из них сформировалась в результате вреза в отложения Дархадского суперпаводка, в других случаях отложения суперпаводка облакают уступы или ложатся на поверхности древних террас. Протяженность террас составляет километры и даже первые десятки километров. В долине р. Енисей (Каа-Хем, Улуг-Хем) выделяются низкая пойма (2–4 м), высокая пойма (6–8 м),

уровни террас 12–14, 18–20, 30, 40–50 и 100 м (см. рис. 12, (а, б)).

Большой объем воды и различные параметры долин (от широких впадин до узких каньонов) на пути прохождения гляциального суперпаводка создали условия для формирования комплекса эрозионно-аккумулятивных форм рельефа. В первую очередь хотелось бы отметить широко распространенные ПГРТ в Тувинской и Дархадской впадинах, а также в долине р. Бий-Хем.

#### **3.7. ПГРТ в долине р. Каа-Хем**

Основная область распространения галечно-валунных отложений ГРТ сосредоточена в Тувинской впадине по долине р. Каа-Хем (Улуг-Хем) от Каахемского нагорья до входа реки в каньон хребта Западный Саян (см. рис. 12, (а, б)). Общая протяженность ПГРТ достигает здесь более 200 км, а их количество приближается к двум десяткам. На всех указанных уровнях террас, кроме низкой и высокой поймы и уровня 100 м, расположены ПГРТ. Также выделяется уровень галечно-валунных отложений, расположенный на высоте 70 м над урезом р. Енисей.

#### **3.8. ПГРТ в долине р. Бий-Хем**

Выявление и изучение форм рельефа, сформированных Дархадским суперпаводком, имеет большое значение для понимания рельефообразующей роли не только в долине р. Каа-Хем (Улуг-Хем), но и в периферийных частях потока. Под периферийными областями мы понимаем долины боковых притоков и сопоставимые речные системы. Дистанционное зондирование и полевые исследования свидетельствуют о воздействии Дархадского суперпаводка также и на долину р. Бий-Хем. В качестве идентификационных признаков выступают ПГРТ. Так, серия ПГРТ распространена на расстоянии до 45 км вверх по течению от устья р. Бий-Хем до устья р. Уюк (рис. 13, (а)).

Наиболее представительными являются ПГРТ, расположенные в устьевой части р. Бий-Хем. Здесь они формировались с учетом рельефа, образованного на начальном этапе прохождения вала воды Дархадского суперпаводка. Выделяются три ПГРТ различной ориентировки (рис. 13, (б, в)).

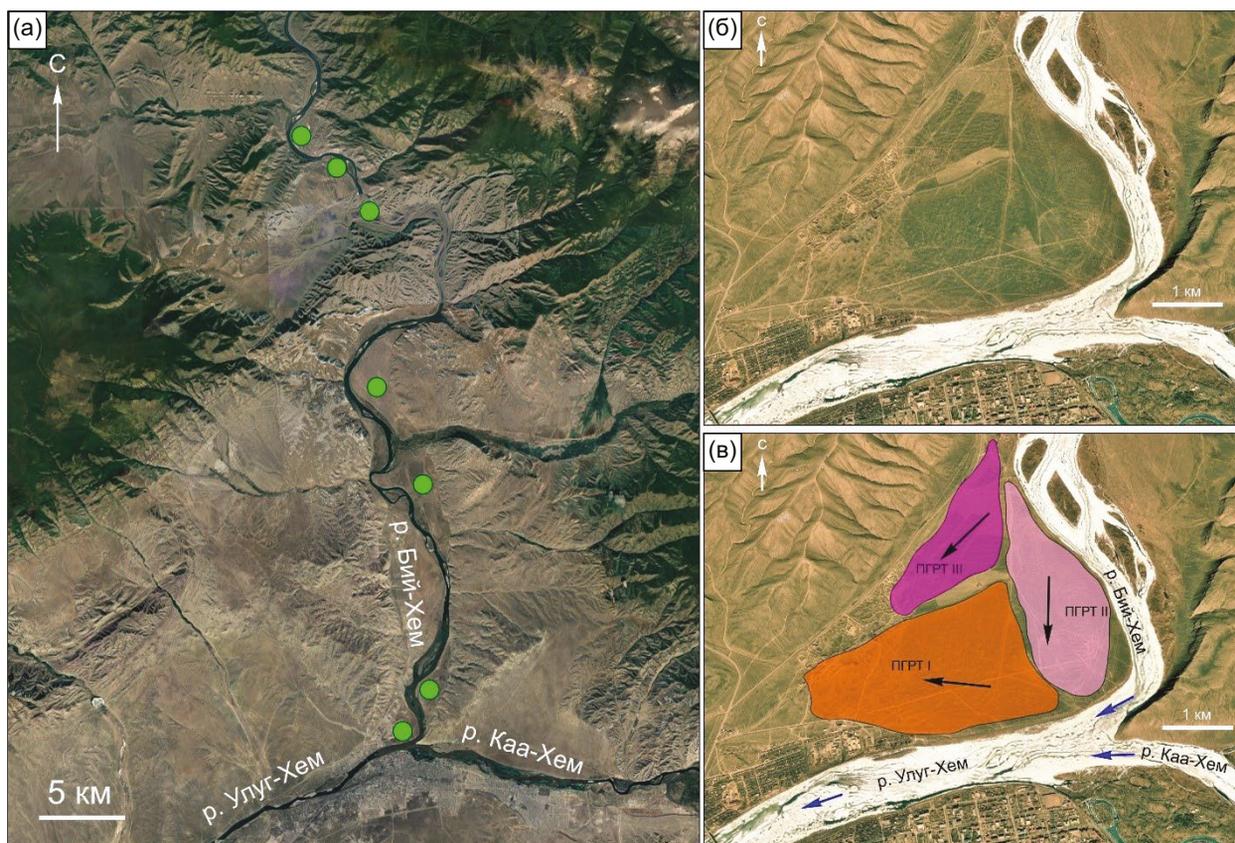
ПГРТ I, размерами 2.2 на 1.3 км, расположено на террасе высотой 25 м. Основное простирание валов с севера на юг свидетельствует о широтном направлении потока (см. рис. 13, (б, в)). ПГРТ II (2.4×0.8 км) вытянуто узкой полосой с севера на юг и расположено к востоку на террасе высотой 15 м. Здесь валы ориентированы с северо-запада на юго-восток. Пространственное положение валов на этом поле соответствует направлению водного потока с севера на юг (см. рис. 13, (б, в)). ПГРТ III (4×0.6 км) расположено к западу от

ПГРТ II и также вытянуто узкой полосой с севера на юг. На данном поле валы, в основной массе, ориентированы субширотно, что говорит о направлении потока с севера на юг (см. рис. 13, (б, в)). Различное направление потоков в устьевой части р. Бий-Хем обусловлено, с одной стороны, разным временем их формирования, с другой – созданным на тот момент микрорельефом. ПГРТ I было образовано потоком, который двигался субширотно по долине р. Каа-Хем. ПГРТ I и ПГРТ II сформировались в период восстановления нормального течения в долине р. Бий-Хем, после подпорного воздействия суперпаводка.

Вверх по долине р. Бий-Хем ПГРТ отмечены вплоть до р. Уюк (см. рис. 13, (а)) (правый приток). Анализ их пространственного распределения показал, что они характерны для террас высотой 10–15, 20–25 и 35 м.

### 3.9. ПГРТ в Дархадской впадине

В Дархадской впадине расположены 2 ПГРТ к северу от озера Цаган-Нур (рис. 14, (а)). Их формирование связано с течениями во внутренней части при быстром спуске Дархадского палеоозера. ПГРТ I (1×1 км) расположено в 1 км к северу от истока р. Шишхид-Гол (рис. 14, (а, б)). Валы сложены окатанной галькой и валунами (рис. 14, (г)), и ориентированы юз-св. ПГРТ II является более крупным (см. рис. 14, (а)) и имеет сложную конфигурацию. Оно расположено в 3.5 км севернее истока р. Шишхид-Гол и имеет размеры 2 на 0.7 км (рис. 14, (а, в)). Пространственное расположение валов свидетельствует о возможных круговых течениях воды при выходе из Дархадской впадины. Валы здесь, в отличие от ПГРТ I, сложены слабоокатанным, либо неокатанным обломочным материалом (рис. 14, (д)).



**Рис. 13.** На космоснимке (программа Google Earth) показан 55 км отрезок р. Бий-Хем с обозначением расположения ПГРТ (зеленые кружки), сформированных под воздействием Дархадского суперпаводка (а); (б, в) – реконструкция направления течений в палеопотоке Дархадского суперпаводка в приустьевой части р. Бий-Хем (программа Google Earth). ПГРТ I, II, III – поля гигантской ряби течения, формировавшиеся в потоках разного направления и разного периода времени в процессе Дархадского суперпаводка.

**Fig. 13.** The satellite image (Google Earth) shows a 55 km section of the Bii-Khem with the location of giant current ripples (green circles) formed under the influence of the Darhad megaflod (a); (б, в) – reconstruction of the direction of currents in the paleoflow of the Darhad megaflod in the mouth part of the Bii-Khem (Google Earth). FGCRs I, II, III – fields of giant current ripples formed in currents of different directions and time during the Darhad megaflod.

### 3.10. Морфология и строение гигантской ряби течения в Тувинской впадине

ГРТ представляет собой систему валов и понижений, ориентированных перпендикулярно или под углом к общему направлению течения реки (рис. 15, (а, в)). Внешне они напоминают обычную песчаную рябь течения, широко распространенную на дне реки. Современные космические технологии позволяют изучать ее методами дистанционного зондирования, проводя анализ космических и радарных снимков высокого разрешения. ГРТ сложена песком, гравием, галечником и валунами (рис. 15, (б); 16, (а-з)). Это зависит от той или иной части ПГРТ, которая формировалась в условиях различных скоростей водного потока.

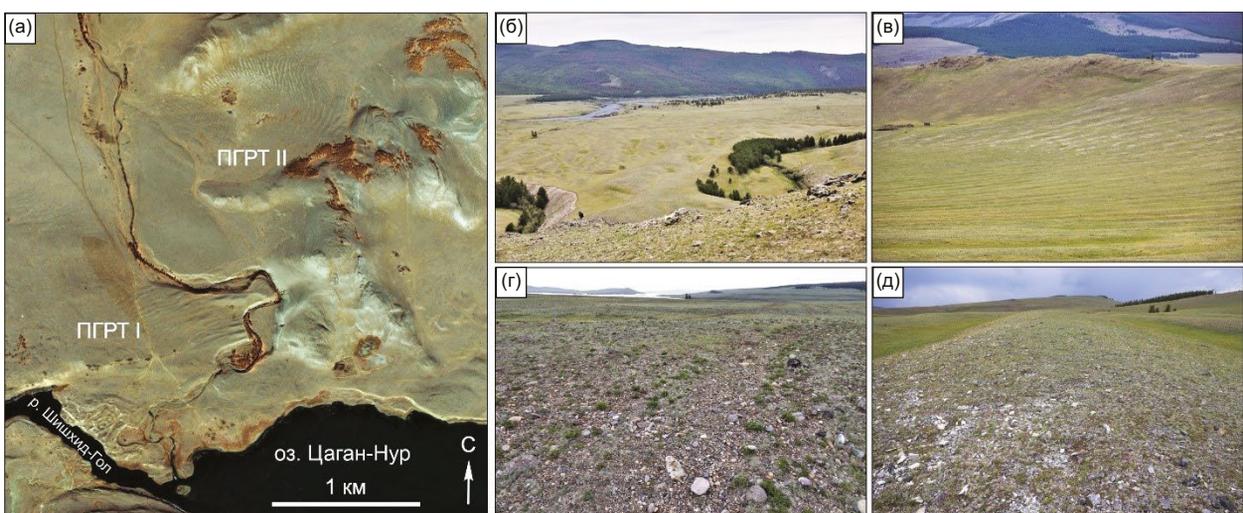
На поверхности имеется большое количество валунов размерами до первых метров в поперечнике. Иногда встречаются каменные “монстры” до 8–10 м. Анализ обломков горных пород, расположенных на поверхности валов и в западинах показал, что перемещение валунов размером 0.5–1 м (рис. 16, (е)) может происходить на расстояние более 100 км (например, базальтовых обломков). Высота валов меняется от 1–2 до 6–7 м, длина может достигать несколько сот метров. Поверхность ГРТ осложнена валами более высоких порядков, расположенными к первым под углом 45–70°. Механизм образования ГРТ подобен механизму формирования грядового рельефа в пределах русла реки.

Периодичность образования ледниково-подпрудного Дархадского палеоозера (Gillespie et al., 2008) дает основание полагать, что и сбросов воды

из этого озера могло быть несколько. Наличие разных уровней ГРТ укладывается в схему многоактности сбросов воды по долине р. Енисей. Сохранившиеся ПГРТ во многих случаях расположены в зоне тени водного потока, созданной изгибом реки и выступающим мысом коренных пород. В некоторых случаях в зоне примыкания отложений ГРТ к коренным склонам имеются понижения в рельефе, представляющие сквозную или слепую долину, поверхность которой также осложнена валами. Строение ГРТ достаточно сложное – от перемешанного галечника с валунами, до гравия и хорошо отмытого горизонтально залегающего песка. В уступах террас обнажаются отложения разной фракции. Более грубый материал часто расположен в областях тени при изгибах русла реки.

Основная часть отложений, сформированная Дархадским суперпаводком, сосредоточена в пределах Тувинской и Минусинской впадин (в статье рассматриваются отложения, сформированные в зоне динамического влияния потока в Тувинской впадине). Отложения представлены различного размера кластическим материалом: песками, гравием, галечником, валунами и глыбами (см. рис. 16, (а-з)).

Песчаные отложения встречаются в виде субгоризонтально-слоистых, хорошо отмытых толщ (см. рис. 16, (а, б)) или интенсивно переработанных ветром дюнных полей (см. рис. 16, (в)). Типичный разрез аллювия песчаной фракции расположен на правом берегу в верхней части 40–50-метровой террасы к северу от пос. Сарыг-Сеп. Он представлен субгоризонтально-слоистыми песками



**Рис. 14.** Местоположение I и II поля гигантской ряби течения в северо-западной части Дархадской впадины (а). Морфология и субстрат слагающий ГРТ: (б, г) – ПГРТ I, (в, д) – ПГРТ II. Космоснимок Google Earth.

**Fig. 14.** Satellite image (Google Earth) shows the location of giant current ripples I and II in the northwestern part of the Darhad Basin (a). The morphology and substrate composing the giant current ripples: (б, г) – GCRs I, (в, д) – GCRs II.

с различной толщиной слоев от 2–3 мм до 15–20 см, с включениями редких галек мощностью 6–8 м (см. рис. 16, (а)), которые залегают на галечниках и перекрыты лёссовидными светлыми супесями.

В некоторых случаях пески с несогласием залегают на косослоистых песчано-галечных отложениях. В песчаных отложениях встречаются инородные блоки, сложенные также песком, однако с текстурой, отличной от вмещающих пород. Ненарушенность блоков предполагает их замороженное состояние во время переноса водой. Об этом же свидетельствуют просадки вышележащих отложений после таяния и уплотнения блоков. В некоторых случаях фиксируются несогласия песков с подстилающими отложениями (см. рис. 16, (б)). Возможно, несогласие фиксирует два эпизода разгрузки Дархадского палеозера.

Галечник и гравий широко распространены в пределах гигантской ряби течения (см. рис. 16, (г, д)). В некоторых разрезах фиксируются деформированные гравийные отложения с редкой крупной галькой, перекрытые супесями. Деформации охватывают отложения толщиной около 1 м. Возможно, деформации связаны с сильными палеоземле-

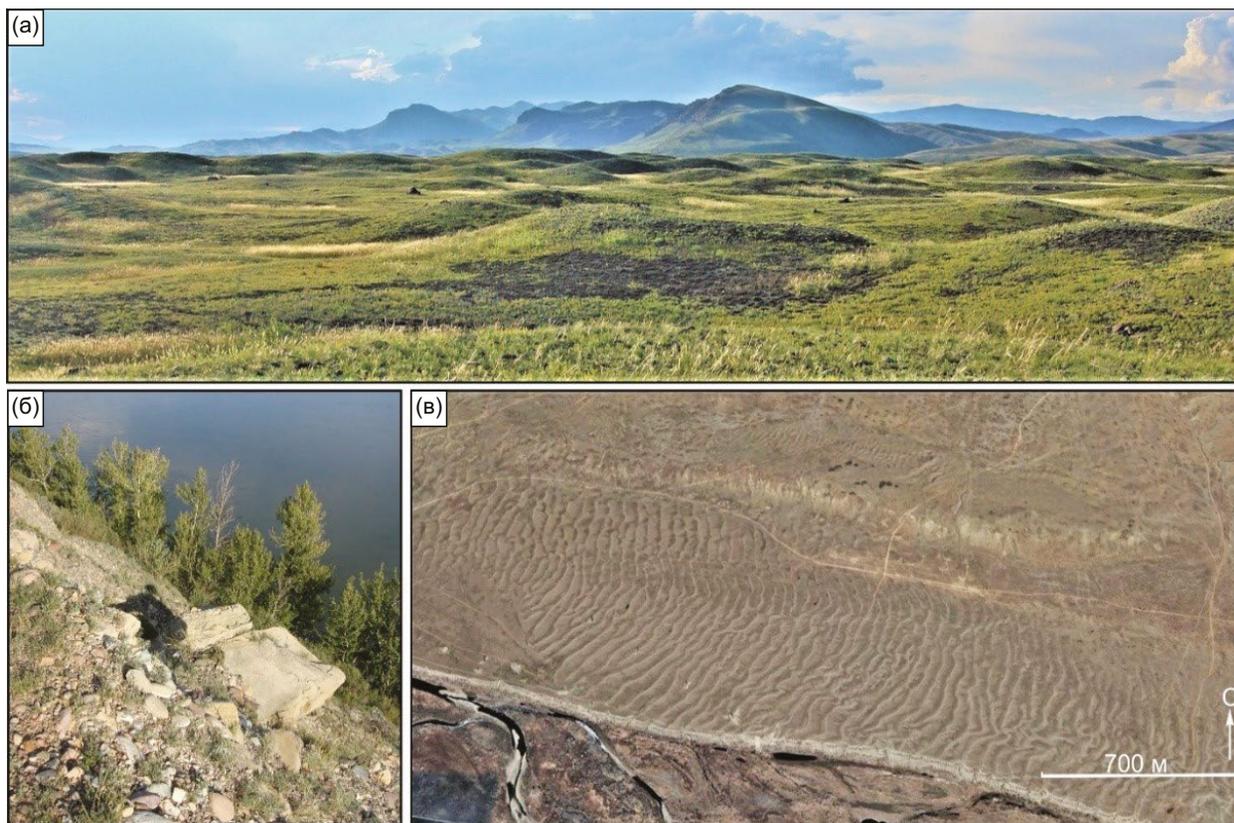
трясениями и представляют собой сейсмические конволюции. На высокую степень сейсмической активности указывают многочисленные грунтовые потоки в горной местности в непосредственной близости от деформированных отложений.

Валуны часто встречаются в разрезах террас и на поверхности ГРТ. Их размеры изменяются от 0.5 м до 8 м (см. рис. 16, (е, ж)). Часть из них хорошо окатана и имеет овальную форму, другие окатаны плохо и представлены крупными угловатыми обломками.

Глыбы коренных пород встречаются как в толще гравийно-галечных отложений, так и на поверхности террас (см. рис. 16, (з, и)). Размеры обломков – от первых десятков сантиметров до первых метров.

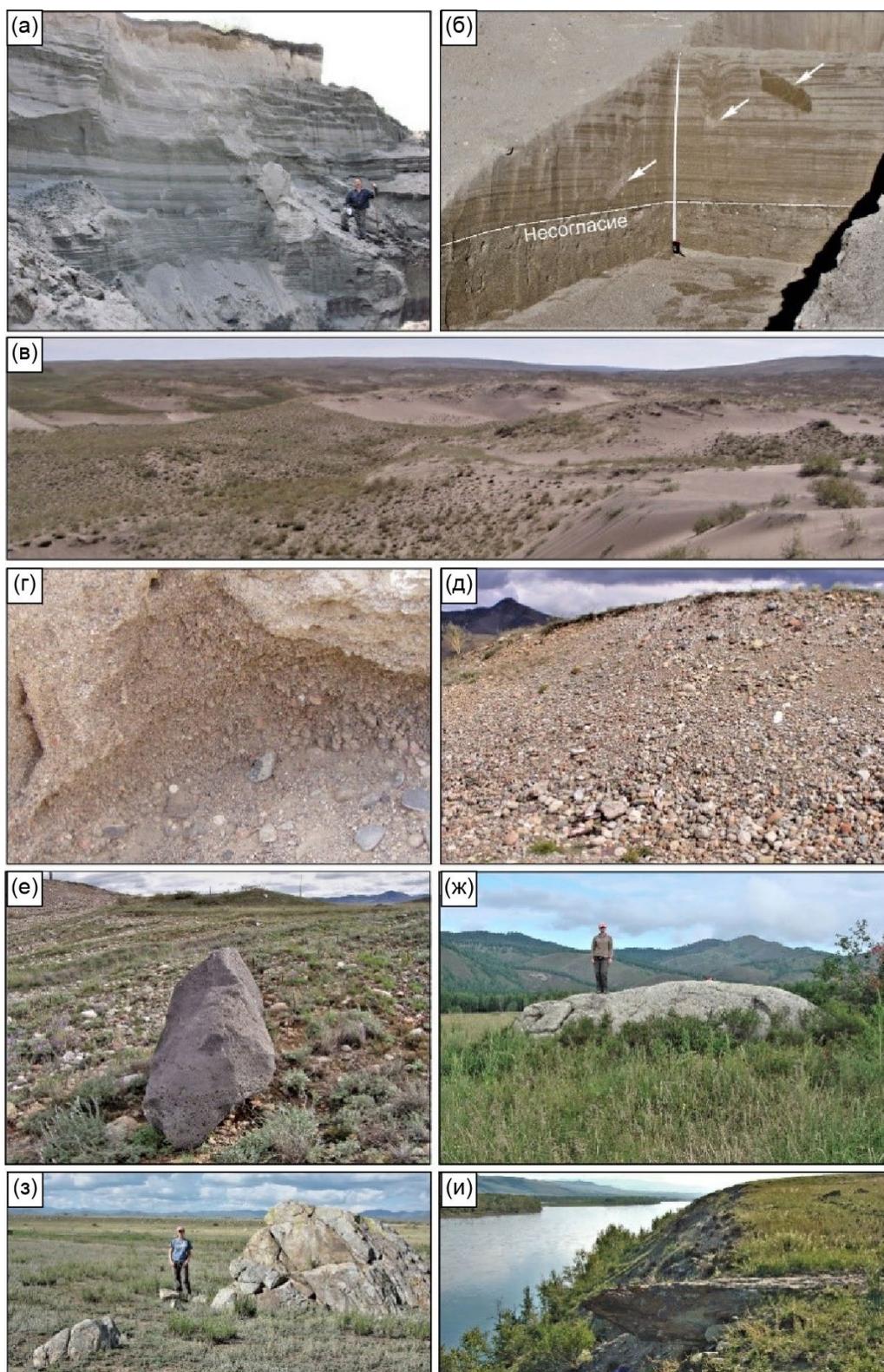
### 3.11. Песчаные гряды и массивы в Тувинской впадине

Основные массивы песчаных отложений расположены при расширении долины в месте слияния рек Бий-Хем и Каа-Хем и напротив долин рек Бий-Хем, Биче-Баян-Кол и Эрбек (рис. 17, (а)). Грядово-ложбинный и гривный рельеф наблюдается на больших пространствах впадины к югу



**Рис. 15.** На photographs и космоснимке (Google Earth) отражена морфология гигантской ряби течения, расположенной в долине р. Енисей (Каа-Хем, Улуг-Хем) (а, б, в).

**Fig. 15.** The photographs and satellite image (Google Earth) reflect the morphology of giant current ripples located in the of Yenisei valley (Kaa-Khem, Ulug-Khem) (а, б, в).



**Рис. 16.** Осадочный комплекс различных размерных фракций, сформированный в долине р. Енисей (Каа-Хем, Улуг-Хем) в результате эрозионно-аккумулятивной деятельности Дархадского суперпаводка и эоловых процессов.

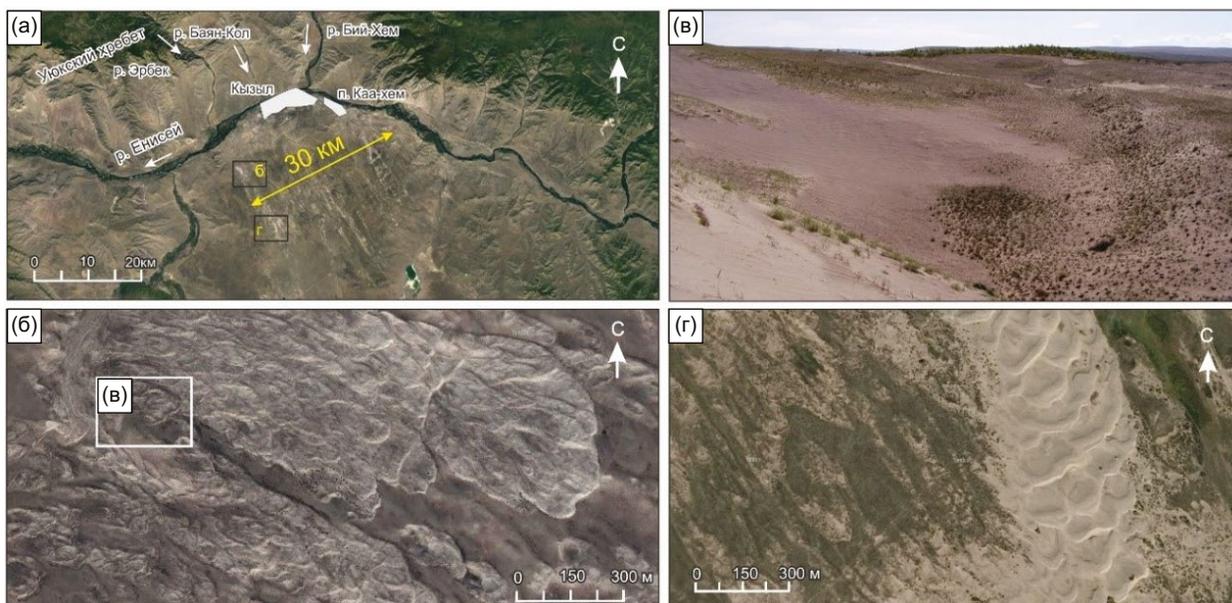
**Fig. 16.** Sedimentary complex of various fractions, formed in the Yenisei valley (Kaa-Khem, Ulug-Khem) as a result of the erosion-accumulation activity of the Darhad megaflood and aeolian processes.

и юго-востоку от г. Кызыл. На космоснимках хорошо видно направление основного песчаного поля по линейно ориентированным структурам на юго-восток от Уюкского хребта (рис. 17, (а)). Его ширина достигает 25–35 км и практически охватывает центральную часть Тувинской впадины. Песчаные массивы, представлены грядово-ложбинным, дюнным и гривным рельефом. Иногда они выражены линейно ориентированными грядами, которые переходят в крупные массивы с сетчато-ячеистой и каплевидной структурой (рис. 17, (б, в, г)).

При общем их фоновом распределении по поверхности впадины выделяются области их существенной концентрации. Песчаные дюны расположены на различных гипсометрических уровнях и в некоторых случаях залегают на поверхности ГРТ (20–30-метровая терраса). Размещение, ориентировка, структура и площадь распространения специфических форм рельефа в пределах Тувинской впадины свидетельствуют о значительном подтоплении в процессе сброса воды из Дархадского палеозера. Первичное залегание песчаных отложений было нарушено интенсивной эоловой переработкой при преобладающих северо-западных ветрах.

### 3.12. Уровень воды и глубина Дархадского суперпаводка в Тувинской впадине

В ходе дешифрирования нами была обнаружена и в дальнейшем обследована в полевых условиях серия террас, сформировавшихся в процессе боковой эрозии при снижении уровня воды в палеопотоке по долине р. Каа-Хем (см. рис. 12, (б)). Террасы представляют собой субгоризонтальные уровни, протяженностью более 5 км, врезанные в коллювиально-делювиальные отложения, залегающие на юрских осадочных породах и гранодиоритах палеозойского возраста (рис. 18, (а, б)). Необходимо отметить, что речь идет о террасах высокого уровня (около 100 м, относительно современного уровня воды в реке). Всего имеется 7 уровней разной сохранности. Наиболее высокие из них зафиксированы на абс. высоте 725 м. На (рис. 18, (а, б)) отчетливо видны элементы террасового комплекса с ярко выраженными горизонтальными поверхностями и уступами как со стороны р. Каа-Хем, так и во временных водотоках. Такие элементы рельефа часто можно увидеть на склонах искусственных водохранилищ при сезонном колебании уровня воды. При наземном обследовании коренных выходов горных пород в пределах террас



**Рис. 17.** Широко распространенные в Тувинской впадине эоловые песчаные массивы первично аллювиального генезиса, связанные с Дархадским суперпаводком. (а) – схема местоположения песчаных массивов и основная их ориентация, согласно преобладающим ветрам; (б, в, г) – детали строения поверхности эоловых песчаных массивов; (а, б, г) – фрагменты космоснимков (Google Earth).

**Fig. 17.** Widespread aeolian sand massifs (a, б, в, г) in the Tuva Basin have a primary alluvial genesis and are associated with the Darhad megaflow. (a) – scheme of the location of sand massifs and their main orientation, according to the prevailing winds; (б, в, г) – details of the surface structure of aeolian sand massifs; (а, б, г) – fragments of satellite images (Google Earth).

не обнаружено. Вероятно, эродирован шлейф склоновых отложений. На поверхности террас имеются слабоокатанные обломки различных метаморфизованных и магматических пород. Выходы юрских пород имеются в нижней части уступа 50-метровой террасы.

**3.13. Уровень воды и глубина Дархадского суперпаводка в долине р. Бий-Хем**

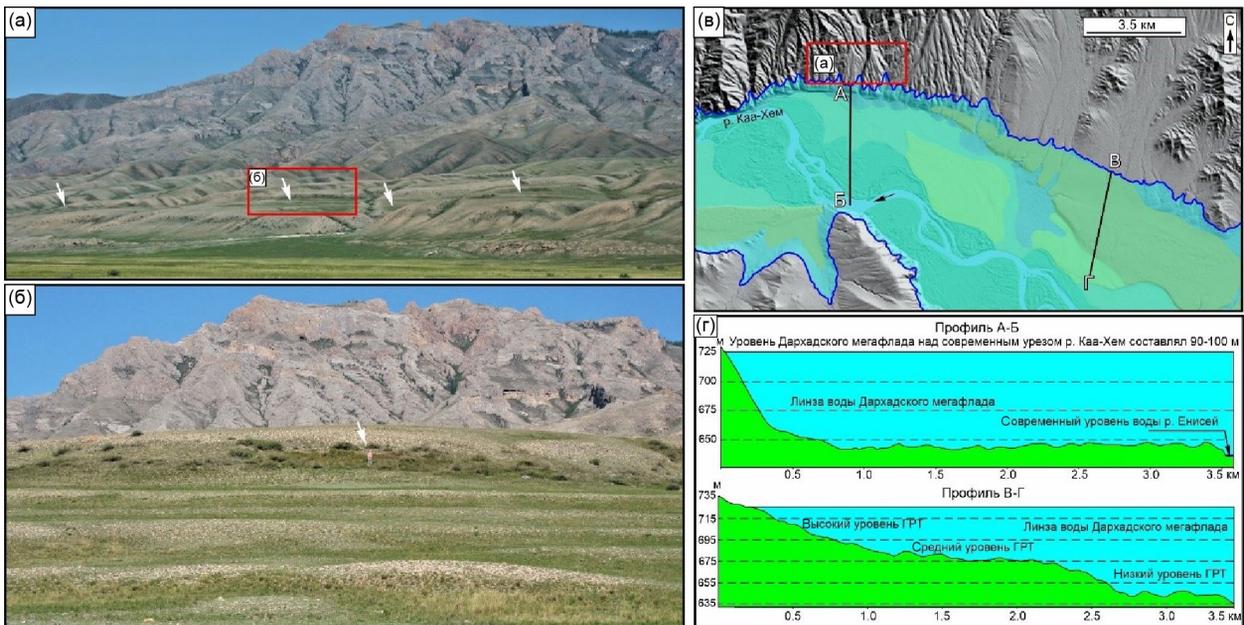
В долине р. Бий-Хем в урочище Бегреда обнаружены аллювиальные отложения на значительной высоте на вершинных поверхностях холмов (52°02.502'N; 94°23.505'E) (рис. 19, (а, б, г, д)). Аллювий представлен галькой, валунами и глыбами (см. рис. 19, (г, д)). Каплевидная форма обследованного холма, характер распределения и залегания аллювия на северо-западном его окончании дают основание утверждать, что накопление отложений в его теневой части происходило в толще воды с обратным течением по отношению к современному (см. рис. 19. (б)). Относительное превышение верхней точки холма над современным уровнем воды в р. Бий-Хем составляет 83 м.

Для определения глубины потока в долине р. Бий-Хем, в пределах Усть-Бегредской депрессии, нами выделена базальная поверхность, представленная селевой фацией (Парначев, 1999;

Зольников, Мистрюков, 2008) Дархадского потока (рис. 19, (е, ж)). Она зафиксирована в виде толщи перемешанных галек, валунов и обломков неокатанных коренных пород (см. рис. 19, (е)) и мощной толщи валунов размером до 1.0–1.5 м в диаметре (см. рис. 19, (ж)), которые расположены на абс. высоте 670 м (см. рис. 19, (а)).

**3.14. Экспонированный возраст валунов ГРТ**

Для ПГРТ в долине р. Каа-Хем (Улуг-Хем) получен экспонированный возраст 19 образцов из отобранных 21. Два образца не имели достаточного количества кварца для датирования. Экспонированный возраст распределился в большом временном диапазоне. На временной шкале древние образцы представлены единичными датами от 137 тыс. л. до 51 тыс. л. (рис. 20). Единичные образцы в дальнейшем анализе не учтены, так как имеют значительное унаследованное количество атомов. В одних случаях это связано с тем, что образец был взят с останца коренных пород, другие, возможно, экспонировались в предыдущие эпохи оледенения. Остальные образцы составляют три возрастные группы: (I) 38–36 тыс. л. (3 образца); (II) 31–27 тыс. л. (7 образцов); (III) 23–18 тыс. л. (4 образца).



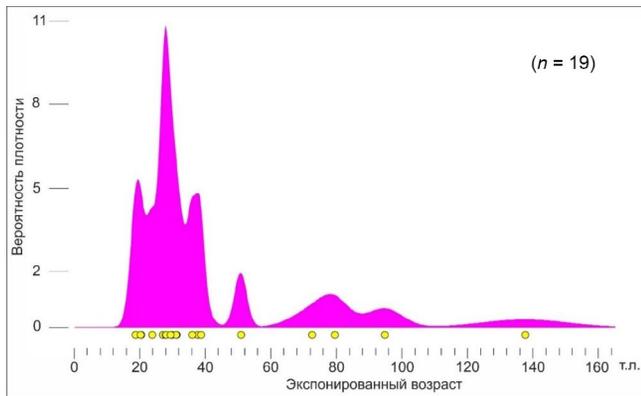
**Рис. 18.** Комплекс террас высотой до 100 м, образованный в результате эрозии склонов долины р. Каа-Хем Дархадским суперпаводком. (а, б) — террасы; (в) — местоположение высоких эрозионных террас в долине р. Каа-Хем; (г) — их соотношение с ПГРТ. Синим контуром на схеме (в) показан максимальный уровень Дархадского суперпаводка в этой части речной долины.

**Fig. 18.** Photographs (а, б) show a complex of terraces up to 100 m high, formed as a result of erosion of the Kaa-Khem valley slopes by Darhad megaflood. Location of high erosion terraces in the Kaa-Khem valley (в) and their relationship with FGCRs (г). The blue outline in diagram (в) shows the maximum level of the Darhad megaflood in this part of the river valley.



**Рис. 19.** Морфология и строение террасового комплекса долины р. Бий-Хем в урочище Бегреда. (а) – общий вид долины р. Бий-Хем в урочище Бегреда (цифровая модель рельефа ALOS). Голубыми кружками и цифрами обозначены абс. высоты местности. Красные кружки обозначают точки наблюдения, буквенные индексы в квадратах соответствуют нижеприведенным фотографиям; (б) – возвышенность (745 м над у. м.), покрытая галечником, валунами и неокатанными глыбами коренных пород. Желтый контур обозначает видимое положение чехла аллювиальных отложений. В красном эллипсе обозначен человек для масштаба. Черная сплошная стрелка показывает современное направление течения р. Бий-Хем. Черная сплошная стрелка показывает реконструированное, временное направление течения р. Бий-Хем, измененное под воздействием Дархадского суперпаводка; (в) – комплекс террас в долине р. Бий-Хем (урочище Бегреда). Цифры отражают высоту террасы. Верхняя часть холма с относительной высотой 83 м сложена галечником и неокатанными глыбами. Уровень террасы 19 м представлен ПРТ; (г, д) – характер распространения и залегания аллювиальных отложений с включением неокатанных глыб коренных пород; (е) – на фотографии представлена толща селевой фации (нижняя часть), сформированной во фронте Дархадского суперпаводка; (ж) – селевая фация, представленная валунами.

**Fig. 19.** Morphology and structure of the terrace complex of the Bii-Khem valley in the Begreda Area. (a) – general view of the Bii-Khem valley in the Begreda Area (ALOS digital elevation model). Blue circles and numbers indicate the altitude of the area. Red circles indicate observation points, letter indices in squares correspond to the photographs below; (б) – the photograph shows a hill (745 m above sea level), covered with pebbles, boulders and unrounded blocks of bedrock. The yellow outline indicates the visible position of the alluvial sediment cover. The red ellipse represents a person for scale. The black solid arrow shows the current direction of the Bii-Khem flow. The black dotted arrow shows the reconstructed, temporary direction of the Bii-Khem flow, modified by the Darhad megaflow; (в) – complex of terraces in the Bii-Khem valley (Begreda Area). The numbers reflect the height of the terrace. The upper part of the hill with a relative height of 83 m is composed of pebbles and unrounded blocks. The terrace level of 19 m is represented by giant current pebbles; (г, д) – The photographs show the nature of the distribution and occurrence of alluvial deposits with the inclusion of unrounded blocks of bedrock; (е) – the thickness of the mudflow facies (lower part) formed in the front of the Darhad megaflow; (ж) – mudflow facies, represented by boulders.



**Рис. 20.** График распределения космогенных ( $^{10}\text{Be}$ ) возрастов, полученных с экспонированных валунов в пределах полей гигантской ряби течения в долине р. Каа-Хем.

**Fig. 20.** Graph of distribution of cosmogenic ( $^{10}\text{Be}$ ) ages obtained from exposed boulders within GCRs in the Kaa-Khem valley.

## 4. ДИСКУССИЯ

### 4.1. Условия образования Дархадского палеоозера

Существование палеоозер в Дархадской впадине в позднем плейстоцене фиксируется по древним озерным террасам и осадочному комплексу. Основным местом подпора для Дархадского палеоозера принято считать устье р. Тенгисийн-Гол, где сохранились следы ледниковой дамбы (Krivonogov et al., 2005; Gillespie et al., 2008; Komatsu et al., 2009; Batbaatar, Gillespie, 2016a, 2016b). Однако полученные новые данные о существовании палеоозера ниже устья р. Тенгисийн-Гол (см. рис. 4) свидетельствуют о более сложной системе подпоров в долине р. Шишхид-Гол, чем предполагалось ранее. Обнаруженные озерные береговые линии с абс. высотой 1713 м ниже тенгисийнольского подпора идентичны максимальным береговым линиям Дархадского палеоозера (см. рис. 4, 5). В таком случае возникает вопрос, являлся ли Тенгисийнольский ледник единственным и основным подпором для Дархадского палеоозера.

Определение параметров ледника по элементам ледникового рельефа в устьевой части р. Тенгисийн-Гол имеет важное значение для оценки вероятности образования здесь ледникового подпора. В устьевой части р. Тенгисийн-Гол имеются ледниковые и озерные элементы рельефа. К ледниковым относятся боковые морены, конечная морена и маргинальные каналы стока талых вод. Все они дают информацию о параметрах краевой части ледника. К озерным элементам рельефа относятся древние береговые линии, сохранившиеся на склонах рек Шишхид-Гол, Тенгисийн-Гол и

свидетельствующие об уровне и контакте водной линзы с коренными породами (см. рис. 10).

Абсолютная высота боковых морен в приустьевой части р. Тенгисийн-Гол, возраст конечной морены в устье левого притока и маргинальные каналы, а также озерные террасы на склоне долины р. Шишхид-Гол дают основания выделить два уровня ледниковой дамбы в МИС 2 (см. рис. 8, 9). На это указывали (Gillespie et al., 2008), датируя верхний ледниковый уровень более древним неопределенным возрастом. Экспонированный возраст валунов ( $23.8 \pm 1.5$  тыс. л. и  $20.7 \pm 1.4$  тыс. л.) с конечной морены Тенгисийнольского ледника, расположенной в устье левого притока Сариг-Гол (Batbaatar, Gillespie, 2016b), относится к ранней стадии и коррелирует с последним ледниковым максимумом. Экспонированный возраст валунов ( $20.8 \pm 1.1$  тыс. л. и  $18.2 \pm 1.0$  тыс. л.) в пределах маргинального канала (Gillespie et al., 2008) характеризует позднюю стадию развития Тенгисийнольского ледника (см. рис. 9).

Результаты реконструкции (см. рис. 8, 9, 10) и наличие высоких (1713 м над у. м.) береговых линий ниже устья р. Тенгисийн-Гол (рис. 4, 5) вызывают сомнения, мог ли действительно Тенгисийнольский ледник, выходящий в долину р. Шишхид-Гол, быть основным подпором для Дархадского палеоозера. Также не ясно, как могли сформироваться озерные береговые линии в устье р. Тенгисийн-Гол, если эта область была покрыта ледником и представляла собой плотину, подпиравшую Дархадское палеоозеро. Таким образом, палеогеографические реконструкции, основанные, в том числе и на возрасте отдельных элементов ледникового рельефа (Gillespie et al., 2008; Batbaatar, Gillespie, 2016a, 2016b), и приведенные на рис. 8, 9, 10, свидетельствуют о частичной, но не ведущей подпорной роли Тенгисийнольского ледника при образовании максимального уровня Дархадского палеоозера.

Анализ космических снимков и цифровых моделей рельефа позволил получить дополнительные данные об условиях и размерах позднеплейстоценового Дархадского озера. Наличие озерных абразионных уровней до и после места выхода Тенгисийнольского ледника в долину р. Шишхид-Гол, а также их совпадение по абс. высоте (1713 м), предполагают наличие крупного подпора ниже устья р. Тенгисийн-Гол. В качестве места этого подпора нами определена область слияния ледников Харабярангийн и Ихжамс (рис. 11) с формированием высокой (300 м) дамбы в долине р. Шишхид-Гол. Ранее эта подпорная область выделялась как подчиненная, с высотами гораздо ниже (рис. 2), чем уровень Дархадского палеоозера (Komatsu et al., 2009; Batbaatar, Gillespie, 2016a). Условия

формирования ледниковой дамбы, достаточной для образования подпора в этом месте, обусловлены параметрами ледосбора и толщиной ледников в двух расположенных друг напротив друга долинах. Слияние ледников в районе дамбы № 4 (см. рис. 2, 11) в долине р. Шишхид-Гол привело к устойчивому состоянию ледника, тем самым обеспечив высокий подпор и условия для формирования Дархадского палеозера глубиной 170–175 м.

#### **4.2. Максимальный уровень воды в Дархадском палеозере в позднем плейстоцене и условия деформации озерных береговых линий после его спуска**

Максимальный абсолютный уровень воды, фиксируемый на космоснимках и радарных данных, соответствует 1713 м (западный борт впадины) и 1711 м (восточный борт впадины, Gillespie et al., 2008). Все другие высокие уровни береговой линии Дархадского палеозера гораздо ниже и варьируют по абс. высоте от 1713 м до 1686 м.

Такое несоответствие показывает существование крупных тектонических опусканий в пределах Дархадской впадины, приведших к значительной деформации древней береговой линии. Описанные выше разломы в северо-западной части впадины сформировались в основном во время существования палеозера (за исключением разлома в пределах Джарагольской морены) и незначительно повлияли на высоту верхней озерной террасы после снижения уровня воды в палеозере. Это видно по значениям высоты верхней террасы (см. рис. 6, (д, е)).

Основные блоковые перемещения произошли уже после начала понижения уровня воды в озере и обнажения комплекса террас. Интенсивная эрозия легкоразмываемых озерных отложений не позволили сохраниться магистральным разрывам внутри впадины, за исключением северо-западного и восточного разломов (см. рис. 5).

Какой же возраст был у озера с абс. уровнем воды 1713 м? По данным (Gillespie et al., 2008) 17–19 тыс. л. н. существовало озеро с абсолютным уровнем 1679 м. Этот уровень был принят на основании существования озерной террасы максимальной высоты в пределах Джарагольской морены (M2) с возрастом 17–19 тыс. л. (Gillespie et al., 2008). Однако неясно, были ли при определении максимальной высоты озерной линии сделаны поправки на амплитуду перемещения по разлому при палеоземлетрясениях, произошедших уже после спуска озера, с суммарной амплитудой сброса до 8 м в районе Джарагольской морены (Сейсмогеология и сейсмичность... 1993 Vason et al., 2003; Arzhannikova et al., 2024), и на возможные криповые движения большей амплитуды. Исходя из

того, что в пределах акватории наряду с террасами 1713 м есть также самые высокие террасы с высотой 1686 м над у. м., можно предположить, что абс. высота 1679 м не является истинным показателем уровня палеозера, а в настоящий момент является результатом тектонических деформаций сбросового типа. В пользу этого говорит тот факт, что в 2 км южнее Джарагольской морены на крутом предгорном склоне были обнаружены пляжные пески с высотой 1711 м над у. м. (Gillespie et al., 2008), которые могут соответствовать абс. высоте 1713 м на западном берегу палеозера. В связи с этим рассмотрение истории развития нижних уровней палеозера выглядит достаточно сложным.

Также дискуссионным может быть предполагаемый уровень палеозера в 1825 м, упоминаемый в работе (Gillespie et al., 2008). Деградирующая береговая линия 1825 м над у. м. в районе озера Заладай при площадном анализе акватории Дархадского палеозера не читается. Таким образом, максимальной береговой линией Дархадского палеозера нами принят уровень 1713 м, который выделял С.К. Кривоногов (Krivonogov et al., 2005).

#### **4.3. Уровень воды Дархадского суперпаводка в Тувинской впадине и в долине р. Бий-Хем**

Полученные данные по параметрам высоких террас в долине р. Каа-Хем и максимальному уровню залегания аллювия в долине р. Бий-Хем дают информацию о максимальной глубине потока воды Дархадского суперпаводка (см. рис. 18, 19). Анализ геоморфологических профилей (см. рис. 18, (в, г)), проведенных по линиям А-Б и В-Г и охвативших весь комплекс террас, показал, что глубина Дархадского потока над современным уровнем р. Каа-Хем в этом месте составила 90–100 м. Исходя из абс. высоты береговой линии в 725 м, ширина водного потока достигала 3.5–5 км. В боковые притоки вода могла заходить на расстоянии до 30 км.

Обнаруженный аллювий в сочетании с неокатанскими глыбами на абс. высоте 745 м и абс. уровень (670 м) расположения селевой фации суперпаводка в урочище Бегреда (долина р. Бий-Хем, в 45 км выше ее устья) позволяют говорить о минимальной глубине потока в 75 м (рис. 19). В долине р. Бий-Хем Дархадский суперпаводок мог создавать подпорный эффект на расстояние до 115 км от устья, что намного отличается от такового в Тувинской впадине.

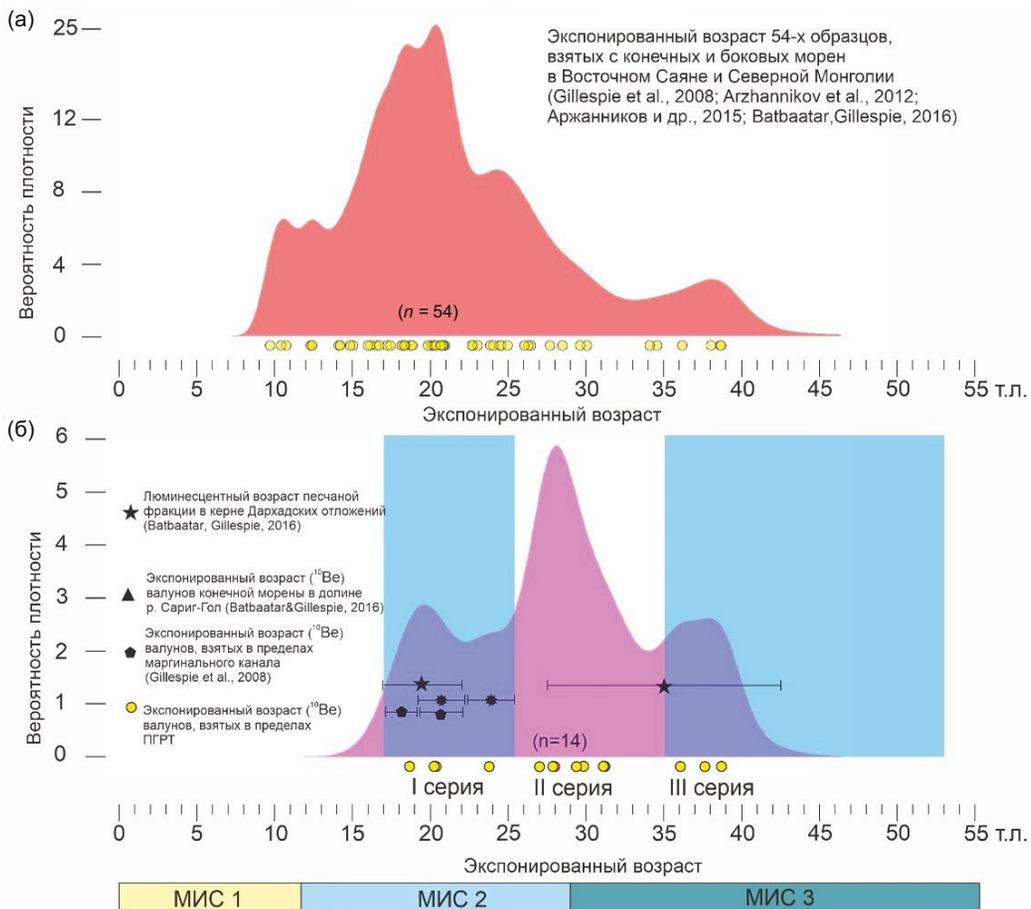
Разница в максимальных абс. высотах уровня воды Дархадского суперпаводка в долинах рек Каа-Хем (основной сток 725 м) и Бий-Хем (правый приток 745 м) указывает на вероятность различных по времени и масштабам событий, связанных

с разгрузкой Дархадского палеоозера. Возможно, что эрозионные формы рельефа раннего, более крупного по масштабам суперпаводка в долине р. Каа-Хем со временем утратили свои явные признаки были нивелированы поздним гляциальным суперпаводком.

**4.4. Возраст и количество Дархадских суперпаводков**

В результате датирования валунов, расположенных в пределах ПГРТ, получены три серии дат. Для анализа и их корреляции с основными событиями позднего плейстоцена нами приведена схема распределения экспонированных образцов

(<sup>10</sup>Be), датирующих основные этапы выдвигания ледников в горных массивах Восточного Саяна и Северной Монголии (Gillespie et al., 2008; Arzhannikov et al., 2012; Arzhannikov et al., 2015; Batbaatar, Gillespie, 2016a, 2016b) (рис. 21, (а)), экспонированный возраст валунов с поверхности морены в долине р. Их-Сариг-Гол и маргинального канала (Batbaatar, Gillespie, 2016b; Gillespie et al., 2008), ГРТ, стадий морской изотопной шкалы и этапов существования Дархадского палеоозера по данным Gillespie et al. (2008) (рис. 21, (б)). Как видно на рис. 21, (б) серии образцов III и I соответствуют МИС 3 и МИС 2. Более много-



**Рис. 21.** Экспонированный возраст ледниковых комплексов Восточного Саяна и Северной Монголии (а) и три пика экспонированных возрастов (<sup>10</sup>Be), связанных с двумя Дархадскими суперпаводками и один с потерей атомов бериллия в результате изменения экспозиции валунов во время второго Дархадского суперпаводка (б). Черной пятиконечной звездой отмечен возраст значительного изменения фракции в осадочном комплексе Дархадского палеоозера. Черной многолучевой звездой показан экспонированный возраст максимального выдвигания Тенгисийингольского ледника (высокий уровень). Черным пятиугольником показан возраст формирования канала стока талых вод Тэнгисийингольского ледника низкого уровня.

**Fig. 21.** Graph (a) displays the exposed age of the moraine of the Eastern Sayan Ridge and Northern Mongolia. Plot (b) shows three peaks in exposed ages (<sup>10</sup>Be) associated with two Darhad megafloods and one with the loss of beryllium atoms due to changes in boulder exposure during the second Darhad megafood. The black five-pointed star marks the age of a significant change in the fraction in the sedimentary complex of the Darhad paleolake. The black multi-rayed star shows the exposed age of the maximum extension of the Tengisiingol glacier (high level). The black pentagon shows the age of formation of the meltwater drainage channel of the low-level Tengisiingol glacier.

численные образцы серии II, расположены в переходной зоне между этими стадиями (переход от относительно теплого времени к похолоданию и оледенению). Соответствие I и III серий образцов времени существования Дархадского палеоозера 19–17 тыс. л. н. и 53–35 тыс. л. н. (Gillespie et al., 2008), свидетельствует о пространственной и временной связи оледенения и прорывных событий. По нашему мнению, они отвечают двум суперпаводкам, произошедшим в интервалы 38–36 тыс. л. н. и 23–18 тыс. л. н. Это косвенно подтверждают данные бурения в Дархадской впадине. Анализ и датирование керн показали, что в периоды  $34.7 \pm 8.1$  тыс. л. н. и  $19.5 \pm 2.6$  тыс. л. н. произошли кардинальные изменения глубины озера (глубина значительно уменьшилась) и начали накапливаться пески с большой долей тяжелой фракции (Batbaatar, Gillespie, 2016b). Изменения глубины могли быть связаны с резким сбросом воды из озера при разрушении ледникового подпора.

Экспонированный возраст II серии дат является суммарным результатом следующих явлений:

- экспозиции валунов в период первого суперпаводка;
- времени накопления атомов  $^{10}\text{Be}$  в период между двумя суперпаводками;
- изменение положения в пространстве и частичная потеря накопленного бериллия  $^{10}\text{Be}$  в процессе второго суперпаводка;
- вторичной фиксации и последующего накопления космогенных атомов до настоящего времени.

Хорошим экспертным образцом для суперпаводка в МИС 2 является гигантский валун ( $8 \times 4 \times 2.5$  м) с возрастом  $20.3 \pm 1.7$  тыс. л. н., расположенный на поверхности 30-метровой террасы (см. рис. 16, (ж)).

Наличие несогласия в аллювиальных отложениях (см. рис. 16, (б)) на высоких 30-метровых террасах может свидетельствовать о нескольких этапах (не менее двух) прорывов ледниковой плотины Дархадского палеоозера. Последний прорыв происходил в холодный период года. Об этом свидетельствуют песчаные блоки, расположенные несогласно с вмещающими отложениями. Оттаивание этих блоков в теплый сезон, привело к просадке вышележащих отложений и формированию изгибовых деформаций.

Таким образом, можно говорить о новом видении формирования Дархадского палеоозера и Дархадских суперпаводков, где основную подпорную роль выполняла крупная ледниковая дамба, расположенная гораздо ниже Тенгисийн-гольского ледника. Ее деградация приводила к формированию суперпаводков, по меньшей мере,

дважды, в МИС 3 и МИС 2. Влияние суперпаводков отразилось в формировании нового эрозионно-аккумулятивного рельефа (каньоны, висячие долины, гигантская рябь течения, песчаные массивы) в долине р. Енисей и на прилегающих территориях.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные комплексные геоморфологические исследования в Дархадской, Тувинской впадинах и датирование ПГРТ в долине р. Енисей позволили реконструировать условия формирования Дархадского палеоозера и определить этапы образования Дархадского суперпаводка:

- данные дешифрирования космических снимков и анализ цифровых моделей рельефа показали значительные деформации береговой линии Дархадского палеоозера. Максимальная абс. высота береговой линии 1713 м, расположенная по периферии Дархадской впадины, снижается до 1686 м в средней ее части. Изменение абсолютной высоты береговой линии связано с тектоническими опусканиями (криповыми движениями и землетрясениями со сбросовой компонентой), характерными для впадин Байкальской рифтовой зоны. Тектонические деформации древней береговой линии произошли после спуска озера и осушения впадины;

- реконструкция, основанная на анализе ледниковых и озерных форм рельефа в устье р. Тенгисийн-Гол и данных датирования, показала, что в МИС 2 было два уровня стояния ледника – в LGM (верхний) и позднее LGM (нижний). Ледниковая дамба в устье р. Тенгисийн-Гол в эти периоды хоть и формировала подпор, но не являлась основной, так как уровень льда в обоих случаях был ниже, чем максимальный уровень Дархадского палеоозера;

- на склонах долины р. Шишхид-Гол ниже устья р. Тенгисийн-Гол обнаружены озерные береговые линии, идентичные таковым в Дархадской впадине с абс. высотой 1713 м. Наличие береговых линий свидетельствует о существовании подпора гораздо ниже устья р. Тенгисийн-Гол;

- анализ данных дистанционного зондирования позволил выявить условия формирования ледниковой дамбы в устьях рек Хара-Бярангийн и Их-Жамс-Гол и позиционировать ее как основную подпор при формировании Дархадского палеоозера;

- в Тувинской впадине и в долине р. Бий-Хем обнаружены признаки водной эрозии и аккумуляции на высоких уровнях рельефа, сформированных в процессе сброса Дархадского палеоозера, что позволяет оценить глубину потока Дархадско-

го суперпаводка. Для долины р. Каа-Хем глубина потока оценена в 100 м над современным уровнем воды и в долине р. Бий-Хем минимальный уровень определен в 75 м относительно уровня селевой фации;

– космогенное датирование ( $^{10}\text{Be}$ ) времени экспонирования валунов с поверхности ГРТ в долине р. Енисей позволил выделить два события, связанных с катастрофическим сбросом воды из Дархадского палеоозера и формированием гляциальных суперпаводков: 38–36 и 23–18 тыс. л. н.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ проект № 20-55-15002 (полевые работы в Республике Тыва, датирование образцов); РНФ проект № 22-17-00049 (полевые геоморфологические исследования в Дархадской впадине); TanDEM-X проект DEM GEOL 1188; национальной программы ASTER AMS (CEREGE, Экс-ан-Прованс, Франция), INSU/CNRS, ANR в рамках Projets thematiques d'excellence. Работы проводились с использованием оборудования ЦКП “Геодинамика и геохронология” ИЗК СО РАН. Авторский коллектив выражает благодарность анонимным рецензентам за внимательное рассмотрение и полезные советы, которые помогли улучшить статью.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аржанников С.Г., Аржанникова А.В. (2011). Позднечетвертичная геодинамика Хиргиснурской впадины и ее горного обрамления (Западная Монголия). *Геология и геофизика*. Т. 52. № 2. С. 276–288.
- Аржанникова А.В., Аржанников С.Г., Акулова В.В. и др. (2014). О происхождении песчаных отложений в Южно-Минусинской котловине. *Геология и геофизика*. Т. 55. № 10. С. 1495–1508.
- Аржанников С.Г., Броше Р., Жоливе М. и др. (2015). К вопросу о позднеплейстоценовом оледенении юга Восточного Саяна и выделении конечных морен МИС 2 на основе бериллиевого датирования ( $^{10}\text{Be}$ ) ледниковых комплексов. *Геология и геофизика*. Т. 56. № 11. С. 1917–1933.  
<https://doi.org/10.15372/GiG20151101>
- Барышников Г.Я. (1979). К вопросу о формировании крупновалунного аллювия р. Бии. В сб.: *Материалы Региональной научно-практической конференции “Геология и полезные ископаемые Алтайского края”*. Барнаул. С. 117–119.
- Борисов Б.А., Минина Е.А. (1982). Особенности формирования ребристых основных морен горных стран и их значение для палеогляциологии. *Материалы гляциологических исследований*. № 44. С. 129–133.
- Бричева С.С., Гоников Т.В., Панин А.В. и др. (2022). О происхождении грядового рельефа Курайской

- котловины (Юго-Восточный Алтай) в свете морфометрических и георадарных исследований. *Геоморфология*. Т. 53. № 4. С. 25–41  
<https://doi.org/10.31857/S0435428122040034>
- Взаимодействие оледенения с атмосферой и океаном. (1987). Под ред. В.М. Котлякова, М.Г. Гросвальда. М.: Наука. 250 с.
- Геологическая карта СССР М-46-V, масштаб 1:200 000. (1964). Под ред. Г.А. Кудрявцева. Л.: Фабрика № 9. 1 лист.
- Гросвальд М.Г., Рудой А.Н. (1996). Четвертичные ледниково-подпрудные озера в горах Сибири. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. № 6. С. 112–126.
- Еникеев Ф.И. (2009). Плейстоценовые оледенения восточного Забайкалья и юго-востока Средней Сибири. *Геоморфология*. № 2. С. 33–49.  
<https://doi.org/10.15356/0435-4281-2009-2-33-49>
- Зольников И.Д., Деев Е.В. (2013). Гляциальные суперпаводки на территории Горного Алтая в четвертичном периоде: условия формирования и геологические признаки. *Криосфера Земли*. Т. 17. № 4. С. 74–82.
- Зольников И.Д., Деев Е.В., Курбанов Р.Н. и др. (2023). Возраст ледниковых и водноледниковых отложений Чибитского гляциокомплекса и его подпрудное озеро (Горный Алтай). *Геоморфология и палеогеография*. Т. 54. № 1. С. 90–98.  
<https://doi.org/10.31857/S0435428123010133>
- Зольников И.Д., Мистрюков А.А. (2008). Четвертичные отложения и рельеф долин Чуи и Катунь. Новосибирск: Параллель. 180 с.
- Зольников И.Д., Новиков И.С., Деев Е.В. и др. (2021). О фациальном составе и стратиграфическом положении четвертичной верхнеенисейской толщи в Тувинской и Минусинской впадинах. *Геология и геофизика*. Т. 62. № 10. С. 137–139.  
<https://doi.org/10.15372/GiG2020186>
- Новиков И.С., Деев Е.В. и др. (2023). Последнее оледенение и ледниково-подпрудные озера в юго-восточной части Горного Алтая. Лед и снег. Т. 63. № 4. С. 639–651.  
<https://doi.org/10.31857/S207667342304018X>
- Парначев С.Г. (1999). Геология высоких алтайских террас (Яломано-Катунская зона). Томск. Изд-во ИПФ ТПУ. 137 с.
- Перепелов А.Б., Кузьмин М.И., Цыпукова С.С. и др. (2017). Эклогитовый след в эволюции позднекайнозойского щелочно-базальтового юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны – геохимические признаки и геодинамические следствия. *Доклады Академии наук*. Т. 476. № 5. С. 553–558.  
<https://doi.org/10.7868/S0869565217290163>
- Рудой А.Н. (1984). Гигантская рябь течения – доказательство катастрофических прорывов гляциальных озер Горного Алтая. В сб.: *Современные геоморфологические процессы на территории Алтайского края*. Бийск. С. 60–64.
- Сейсмотектоника и сейсмичность Прихубсугулья. (1993). Под ред. Н.А. Логачева. Новосибирск: Наука. 182 с.

- Селиванов Е.И. (1967). Неоген-четвертичные озера-гиганты в Забайкалье и Северной Монголии. *Доклады Академии наук СССР*. Т. 177. № 1. С. 175–178.
- Селиванов Е.И. (1968). Спущенные озера. *Природа*. № 3. С. 81–82.
- Сpirкин А.И. (1970). О древних озерах Дархадской котловины. В сб.: *Геология мезозоя и кайнозоя Западной Монголии*. М.: Наука. С. 143–150.
- Сугоракова А.М., Ярмолюк В.В., Лебедев В.И. (2003). *Кайнозойский вулканизм Тувы*. Кызыл: ТУВИКОПР СО РАН. 92 с.
- Уфлянд А.К., Ильин А.В., Спиркин А.И. (1969). Впадины байкальского типа Северной Монголии. *Бюллетень МОИП. Отдел геологический*. Т. 44. № 6. С. 5–22.
- Уфлянд А.К., Ильин А.В., Спиркин А.И. и др. (1971). Основные черты стратиграфии и условия формирования кайнозойских образований Прикосоголья (МНР). *Бюллетень МОИП. Отдел геологический*. Т. 46. № 1. С. 54–69.
- Цыпукова С.С., Перепелов А.Б., Демонтерова Е.И. и др. (2022). Два этапа кайнозойского щелочно-базальтового вулканизма Дархатской впадины (Северная Монголия) – геохронология, геохимия и геодинамические следствия. *Геодинамика и тектонофизика*. Т. 13. № 3. С. 1–15.  
<https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-3-0613>
- Arzhannikov S., Arzhannikova A., Braucher R. (2023). Darhad megaflood (southern Siberia): Cause, age and consequence. *Quat. Int.* № 643. P. 1–21.  
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2022.10.002>
- Arzhannikov S.G., Braucher R., Jolivet M. et al. (2012). History of late Pleistocene glaciations in the central Sayan-Tuva Upland (southern Siberia). *Quat. Sci. Rev.* V. 49. P. 16–32.  
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.06.005>
- Arzhannikova A.V., Arzhannikov S.G., Chebotarev A.A. (2024). Morphotectonics and paleoseismology of the North Darhad fault (SW Baikal Rift, Mongolia). *J. of Asian Earth Sci.* V. 259. 105882.  
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2023.105882>
- Batbaatar J., Gillespie A.R. (2016a). Outburst floods of the Maly Yenisei. Part I. *Int. Geology Rev.* № 14. P. 1723–1752.  
<https://doi.org/10.1080/00206814.2015.1114908>
- Batbaatar J., Gillespie A.R. (2016b). Outburst floods of the Maly Yenisei. Part II – new age constraints from Darhad basin. *Int. Geology Rev.* № 14. P. 1753–1779.  
<https://doi.org/10.1080/00206814.2016.1193452>
- Bacon S.N., Bayasgalan A., Gillespie A.R. et al. (2003). Paleoseismic displacement measurements from landforms subjected to periglacial processes: observations along the Jarai Gol fault near the Tamyn Am Hills, Darhad Depression, northern Mongolia. *XVI Inqua Congress, Abstract with Programs*. P. 103.
- Baker V.R. (1973). Paleohydrology and sedimentology of Lake Missoula flooding in Eastern Washington. *Geological Society of America. Special Paper*. V. 144. P. 1–79.  
<https://doi.org/10.1130/SPE144-p1>
- Baker V.R., Benito G., Rudoy A.N. (1993). Paleohydrology of Late Pleistocene superflooding, Altay Mountains, Siberia. *Science*. V. 259. № 5093. P. 348–350.
- Baker V.R., Bunker R.C. (1985). Cataclysmic late Pleistocene flooding from Glacial Lake Missoula: a review. *Quat. Sci. Rev.* V. 4. P. 1–41.  
[https://doi.org/10.1016/0277-3791\(85\)90027-7](https://doi.org/10.1016/0277-3791(85)90027-7)
- Benito G., Thorndyraft V. (2020). Catastrophic glacial lake outburst flooding of the Patagonian Ice Sheet. *Earth-Science Rev.* V. 200. 102996.  
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102996>
- Chmeleff J., von Blanckenburg F., Kossert K. et al. (2010). Determination of the <sup>10</sup>Be half-life by multicollector ICP-MS and liquid scintillation counting. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* 268. P. 192–199.  
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2009.09.012>
- Clark P., Marshall S., Clarke G. (2001). Freshwater Forcing of Abrupt Climate Change During the Last Glaciation. *Science*. V. 293. № 5528. P. 283–287.  
<https://www.science.org/doi/epdf/10.1126/science.1062517>
- Clarke G., Leverington D., Teller J. et al. (2004). Paleohydraulics of the last outburst flood from glacial Lake Agassiz and the 8200 BP cold event. *Quat. Sci. Rev.* V. 23. Iss. 3–4. P. 389–407.  
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.06.004>
- Gillespie A.R., Burke R.M., Komatsu G. et al. (2008). Late Pleistocene glaciers in Darhad Basin, northern Mongolia. *Quat. Res.* V. 69. Iss. 2. P. 169–187.  
<https://doi.org/10.1016/j.yqres.2008.01.001>
- Gosse J.C., Phillips F.M. (2001). Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application. *Quat. Sci. Rev.* V. 20. P. 1475–1560.  
[https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(00\)00171-2](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(00)00171-2)
- Kleiven H., Kissel C., Laj C. et al. (2008). Reduced North Atlantic Deep Water Coeval with the Glacial Lake Agassiz Freshwater Outburst. *Science*. V. 319. № 5859. P. 60–64.  
<https://doi.org/10.1126/science.1148924>
- Komatsu G., Arzhannikov S.G., Gillespie A. et al. (2009). Quaternary paleolake formation and cataclysmic flooding along the upper Yenisei River. *Geomorphology*. V. 104. Iss. 3–4. P. 143–164.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.08.009>
- Komatsu G., Baker V., Arzhannikov S. (2016). Catastrophic flooding, palaeolakes, and late Quaternary drainage reorganization in northern Eurasia. *Int. Geology Rev.* V. 58. Iss. 14. P. 1693–1722.  
<https://doi.org/10.1080/00206814.2015.1048314>
- Korschinek G., Bergmaier A., Faestermann T. (2010). A new value for the half-life of <sup>10</sup>Be by heavy-ion elastic recoil detection and liquid scintillation counting. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* 268. P. 187–191.  
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2009.09.020>
- Krivonogov S.K., Sheinkman V.S., Mistryukov A.A. (2005). Stages in the development of the Darhad dammed lake (Northern Mongolia) during the Late Pleistocene and Holocene. *Quat. Int.* V. 136. Iss. 1. P. 83–94.  
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2004.11.010>
- Krivonogov S.K., Yi S., Kashiwaya K. (2012). Solved and unsolved problems of sedimentation, glaciation and palaeolakes of the Darhad Basin, Northern Mongolia. *Quat. Sci. Rev.* V. 56. P. 142–163.  
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.08.013>

- Margold M., Jansson K., Stroeven A. et al. (2011). Glacial Lake Vitim, a 3000-km<sup>3</sup> outburst flood from Siberia to the Arctic Ocean. *Quat. Res.* V. 73. Iss. 3. P. 393–396. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2011.06.009>
- Margold M., Jansen J., Codilean A. et al. (2018). Repeated megafloods from Lake Vitim, Siberia, to the Arctic Ocean over the past 60000 years. *Quat. Sci. Rev.* V. 187. P. 41–61. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.03.005>
- Martini I.P., Baker V.R., Garzon G. (Eds.). (2002). Flood and Megaflood Processes and Deposits: Recent and Ancient Examples. *Int. Association of Sedimentologists Special Publication.* V. 32. Blackwell Science. London. 320 p.
- Norris S.L., Garcia-Castellanos D., Jansen J.D. et al. (2021). Catastrophic drainage from the northwestern outlet of glacial Lake Agassiz during the Younger Dryas. *Geophysical Res. Letters.* V. 48. Iss. 15. e2021GL093919. <https://doi.org/10.1029/2021GL093919>
- O'Connor J.E., Costa J.E. (2004). The world's largest floods, Past and Present: Their causes and magnitudes. U.S. Geological Survey Circular 1254: Reston. VA. U.S. Geological Survey. 13 p.
- Rudoy A.N., Baker V.R. (1993). Sedimentary effects of cataclysmic late Pleistocene glacial outburst flooding, Altay Mountains, Siberia. *Sediment. Geol.* V. 85. Iss. 1-4. P. 53–62. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(93\)90075-G](https://doi.org/10.1016/0037-0738(93)90075-G)
- Rudoy A.N. (2002). Glacier-dammed lakes and geological work of glacial superfloods in the Late Pleistocene, Southern Siberia, Altai Mountains. *Quat. Int.* V. 87. Iss. 1. P. 119–140. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(01\)00066-0](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(01)00066-0)
- Stolz C., Hülle D., Hilgers A. et al. (2012). Reconstructing fluvial, lacustrine and aeolian process dynamics in Western Mongolia. *Zeitschrift für Geomorphologie.* V. 56. Iss. 3. P. 267–300. <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2012/0078>
- Stone J.O. (2000). Air pressure and cosmogenic isotope production. *J. of Geophysical Res.* V. 105. Iss. B10. P. 23753–23759. <https://doi.org/10.1029/2000JB900181>
- Wagner G.A. (1998). Age determination of young rock and artifacts. Springer. 466 p.

## DARHAD PALEOLAKE AND DARHAD GLACIAL MEGAFLOODS IN THE CONTEXT OF CATAFLUVIAL EVENTS IN NORTH ASIA IN THE LATE PLEISTOCENE<sup>1</sup>

S. G. Arzhannikov<sup>a,#</sup>, A. V. Arzhannikova<sup>a</sup>, and R. Braucher<sup>b,c</sup>

<sup>a</sup> *Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia*

<sup>b</sup> *French National Centre for Scientific Research (CNRS), Aix-en-Provence, France*

<sup>c</sup> *Centre européen de recherche et d'enseignement de géosciences de l'environnement (CEREGE), Aix-en-Provence, France*

<sup>#</sup> *E-mail: sarzhan@crust.irk.ru*

A set of geomorphological and geochronological studies was carried out aimed at determining the reasons for the formation of the periglacial Darhad paleolake and the age of the Darhad megafloods (glacial superflood). The main landforms and sedimentary strata from the Darhad Basin to the Western Sayan Ridge, formed in the zone of dynamic influence of the glacial superflood, are characterized. Based on analysis, satellite images, digital elevation model, mapping and reconstruction, new data were obtained on the conditions for the formation of the glacier dam in the valley of the Shishkhid-Gol. The confluence of the large glaciers Khara-Byarangiin-Gol and Ikh-Dzhams-Gol below the mouth of the Tengisiin-Gol formed a backwater of the Shishkhid-Gol with a height of 300 m. The presence of ancient coastlines up to an altitude of 1713 m in the immediate vicinity of the newly identified glacial dam indicates its dominant role in the formation of the Darhad paleolake. Within the Darhad Basin, as a result of an analysis of the absolute heights of the highest coastline of the Darhad paleolake, downward tectonic deformations were revealed over the last 18–23 ka with an amplitude of 27 m. As a result of field research and cosmogenic dating (<sup>10</sup>Be), the first dates were obtained for the exposure of boulders within four fields of gravel dunes, as well as an erratic boulder exposed within a bar in the valley of the Kaa-Khem. The age distribution of 14 samples showed a scatter of dates within the range of 38–18 ka, which have three peaks. Two of them correspond to two megafloods of 38–36 ka and 23–18 ka and one, intermediate, associated with intermittent exposure resulting from the impact of a second megaflood on boulder exposure within gravel dunes.

**Keywords:** Late Pleistocene glaciation; ice-dammed lake, giant current ripple, <sup>10</sup>Be cosmic-ray exposure dating

<sup>1</sup> *For citation:* Arzhannikov S.G., Arzhannikova A.V., Braucher R. (2024). Darhad paleolake and Darhad glacial megafloods in the context of catafluvial events in North Asia in the Late Pleistocene. *Geomorfologiya i Paleogeografiya.* V. 55. № 4. P. 78–110. (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2949178924040069>; <https://elibrary.ru/FGTNSC>

## ACKNOWLEDGMENTS

The study was funded by the Russian Foundation for Basic Research, Project № 20-55-15002 (field work in the Republic of Tyva, dating of samples); by the Russian Science Foundation, Project № 22-17-00049 (field geomorphological studies in the Darhad Basin). Remote sensing analysis was possible thanks to the TanDEM-X, Project DEM\_GEOL1188. The ASTER AMS national facility (CEREGE, Aix-en-Provence) is supported by the INSU/CNRS, the ANR through the “Projets thématiques d’excellence” program for the “Equipements d’excellence” ASTER-CEREGE action and IRD. The work was carried out using the equipment of the Center for Collective Use “Geodynamics and Geochronology” of the Institute of the Earth’s crust SB RAS. The authors express their gratitude to the anonymous reviewers for their careful consideration and useful advice that helped to improve the article.

## REFERENCES

- Arzhannikov S.G., Arzhannikova A.V. (2011). The Late Quaternary Geodynamics of the Hyargas Nuur Basin and Bordering Scarps (western Mongolia). *Russian Geology and Geophysics*. V. 52. № 2. P. 220–229. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.12.016>
- Arzhannikov S., Arzhannikova A., Braucher R. (2023). Darhad megaflood (southern Siberia): Cause, age and consequence. *Quat. Int.* № 643. P. 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2022.10.002>
- Arzhannikov S.G., Braucher R., Jolivet M. et al. (2012). History of late Pleistocene glaciations in the central Sayan-Tuva Upland (southern Siberia). *Quat. Sci. Rev.* V. 49. P. 16–32. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.06.005>
- Arzhannikov S.G., Braucher R., Jolivet M. et al. (2015). Late Pleistocene glaciations in southern East Sayan and detection of MIS 2 terminal moraines based on beryllium ( $^{10}\text{Be}$ ) dating of glacier complexes. *Russian Geology and Geophysics*. V. 56. № 11. P. 1509–1521. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.10.001>
- Arzhannikova A.V., Arzhannikov S.G., Akulova V.V. et al. (2014). The Origin of Sand Deposits in the South Minusa Basin. *Russian Geology and Geophysics*. V. 55. № 10. P. 1183–1194. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.09.004>
- Arzhannikova A.V., Arzhannikov S.G., Chebotarev A.A. (2024). Morphotectonics and paleoseismology of the North Darhad fault (SW Baikal Rift, Mongolia). *J. of Asian Earth Sci.* V. 259. 105882. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2023.105882>
- Bacon S.N., Bayasgalan A., Gillespie A.R. et al. (2003). Paleoseismic displacement measurements from landforms subjected to periglacial processes: observations along the Jarai Gol fault near the Tamyn Am Hills, Darhad Depression, northern Mongolia. *XVI Inqua Congress, Abstract with Programs*. P. 103.
- Baker V.R. (1973). Paleohydrology and sedimentology of Lake Missoula flooding in Eastern Washington. *Geological Society of America. Special Paper*. V. 144. P. 1–79. <https://doi.org/10.1130/SPE144-p1>
- Baker V.R., Benito G., Rudoy A.N. (1993). Paleohydrology of Late Pleistocene superflooding, Altay Mountains, Siberia. *Science*. V. 259. № 5093. P. 348–350.
- Baker V.R., Bunker R.C. (1985). Cataclysmic late Pleistocene flooding from Glacial Lake Missoula: a review. *Quat. Sci. Rev.* V. 4. P. 1–41. [https://doi.org/10.1016/0277-3791\(85\)90027-7](https://doi.org/10.1016/0277-3791(85)90027-7)
- Baryshnikov G.Ya. (1979). On the issue of the formation of large boulder alluvium of the Biy river. In: *Materialy Regional’noi nauchno-prakticheskoi konferentsii “Geologiya i poleznye iskopaemye Altaiskogo kraya”*. Barnaul. P. 117–119. (in Russ.)
- Batbaatar J., Gillespie A.R. (2016a). Outburst floods of the Maly Yenisei. Part I. *Int. Geology Rev.* V. 58. Iss. 14. P. 1723–1752. <https://doi.org/10.1080/00206814.2015.1114908>
- Batbaatar J., Gillespie A.R. (2016b). Outburst floods of the Maly Yenisei. Part II – new age constraints from Darhad basin. *Int. Geology Rev.* V. 58. Iss. 14. P. 1753–1779. <https://doi.org/10.1080/00206814.2016.1193452>
- Benito G., Thorndycraft V. (2020). Catastrophic glacial lake outburst flooding of the Patagonian Ice Sheet. *Earth-Science Rev.* V. 200. 102996. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102996>
- Borisov B.A., Minina E.A. (1982). Features of the formation of ribbed main moraines in mountainous countries and their significance for paleoglaciology. *Materialy glyat-siologicheskikh issledovaniy*. V. 44. P. 129–133. (in Russ.)
- Bricheva S. S., Gonikov T. V., Panin A. V. et al. (2022). The origin of giant dunes in the Kuray Basin (Southeastern Gorny Altai) based on morphometric analysis and GPR studies. *Geomorfologiya*. V. 53. No. 4. P. 25–41. (in Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0435428122040034>
- Chmieleff J., von Blanckenburg F., Kossert K. et al. (2010). Determination of the  $^{10}\text{Be}$  half-life by multicollector ICP-MS and liquid scintillation counting. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* 268. P. 192–199. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2009.09.012>
- Clark P., Marshall S., Clarke G. (2001). Freshwater Forcing of Abrupt Climate Change During the Last Glaciation. *Science*. V. 293. Iss. 5528. P. 283–287. <https://www.science.org/doi/epdf/10.1126/science.1062517>
- Clarke G., Leverington D., Teller J. et al. (2004). Paleohydraulics of the last outburst flood from glacial Lake Agassiz and the 8200 BP cold event. *Quat. Sci. Rev.* V. 23. Iss. 3–4. P. 389–407. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.06.004>
- Enikeev F.I. (2009). Pleistocene glaciations of eastern Transbaikalia and south-east of Middle Siberia. *Geomorfologiya*. № 2. P. 33–49. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2009-2-33-49>
- Gillespie A.R., Burke R.M., Komatsu G. et al. (2008). Late Pleistocene glaciers in Darhad Basin, northern Mongolia. *Quat. Res.* V. 69. Iss. 2. P. 169–187. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2008.01.001>

- Gosse J.C., Phillips F.M. (2001). Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application. *Quat. Sci. Rev.* V. 20. P. 1475–1560.  
[https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(00\)00171-2](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(00)00171-2)
- Grosswald M.G., Rudoy A.N. (1996). Quaternary glacial-dammed lakes in the Siberian Mountains. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii nauk. Seriya geograficheskaya.* № 6. P. 112–126. (in Russ.)
- Kleiven H., Kissel C., Laj C. et al. (2008). Reduced North Atlantic Deep-Water Coeval with the Glacial Lake Agassiz Freshwater Outburst. *Science.* V. 319. № 5859. P. 60–64.  
<https://doi.org/10.1126/science.1148924>
- Komatsu G., Arzhannikov S.G., Gillespie A. et al. (2009). Quaternary paleolake formation and cataclysmic flooding along the upper Yenisei River. *Geomorphology.* V. 104. Iss. 3-4. P. 143–164.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.08.009>
- Komatsu G., Baker V., Arzhannikov S. (2016). Catastrophic flooding, palaeolakes, and late Quaternary drainage reorganization in northern Eurasia. *Int. Geology Rev.* V. 58. Iss. 14. P. 1693–1722.  
<https://doi.org/10.1080/00206814.2015.1048314>
- Korschinek G., Bergmaier A., Faestermann T. (2010). A new value for the half-life of  $^{10}\text{Be}$  by heavy-ion elastic recoil detection and liquid scintillation counting. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* 268. P. 187–191.  
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2009.09.020>
- Kotlyakov V.M., Grosswald M.G. (Eds.). (1987). *Vzaimodeistvie oledeneniya s atmosferoi i okeanom.* (Interaction of glaciation with the atmosphere and ocean). Moscow: Nauka (Publ.). 250 p. (in Russ.)
- Krivonogov S.K., Sheinkman V.S., Mistryukov A.A. (2005). Stages in the development of the Darhad dammed lake (Northern Mongolia) during the Late Pleistocene and Holocene. *Quat. Int.* V. 136. Iss. 1. P. 83–94.  
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2004.11.010>
- Krivonogov S.K., Yi S., Kashiwaya K., Kim J.C. (2012). Solved and unsolved problems of sedimentation, glaciation and palaeolakes of the Darhad Basin, Northern Mongolia. *Quat. Sci. Rev.* V. 56. P. 142–163.  
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.08.013>
- Kudryavtseva G.A. (Ed). (1964). *Geologicheskaya karta SSSR M-46-V, m-ba 1:200 000* (Geological map of the USSR M-46-V, scale 200 000). Leningrad: Fabrika № 9 (Publ.). 1 p.
- Logachev N.A. (Eds.). (1993). *Seismotektonika i seismichnost' Prihubsugul'ya* (Seismotectonics and seismicity of the Khubsugul region). Novosibirsk: Nauka (Publ.). 182 p. (in Russ.)
- Margold M., Jansson K., Stroeven A. et al. (2011). Glacial Lake Vitim, a 3000-km<sup>3</sup> outburst flood from Siberia to the Arctic Ocean. *Quat. Res.* V. 73. Iss. 3. P. 393–396.  
<https://doi.org/10.1016/j.yqres.2011.06.009>
- Margold M., Jansen J., Codilean A. et al. (2018). Repeated megafloods from Lake Vitim, Siberia, to the Arctic Ocean over the past 60000 years. *Quat. Sci. Rev.* V. 187. P. 41–61.  
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.03.005>
- Martini I.P., Baker V.R., Garzon G. (Eds.). (2002). *Flood and Megaflood Processes and Deposits: Recent and Ancient Examples.* *Int. Association of Sedimentologists. Special Publication.* V. 32. Blackwell Science. London. 320 p.
- Norris S.L., Garcia-Castellanos D., Jansen J. D. et al. (2021). Catastrophic drainage from the northwestern outlet of glacial Lake Agassiz during the Younger Dryas. *Geophysical Res. Letters.* V. 48. Iss. 15. e2021GL093919.  
<https://doi.org/10.1029/2021GL093919>
- O'Connor J.E., Costa J.E. (2004). *The world's largest floods, Past and Present: Their causes and magnitudes.* U.S. Geological Survey Circular 1254: Reston. VA. U.S. Geological Survey. 13 p.
- Parnachev S.G. (1999). *Geologiya vysokikh altaiskikh terras (Yalomano-Katunskaya zona) (Geology of high Altai terraces (Yalomano-Katun zone)).* Tomsk: IAP TPU (Publ.). 137 p. (in Russ.)
- Perepelov A.B., Kuzmin M.I., Tsypukova S.S. et al. (2017). Eclogite trace in evolution of late Cenozoic alkaline basalt volcanism on the southwestern flank of the Baikal Rift Zone: geochemical features and geodynamic consequences. *Dokl. Earth Sci.* V. 476. № 2. P. 1187–1192.  
<https://doi.org/10.1134/S1028334X1710018X>
- Rudoy A.N. (1984). The giant current ripples are proof of the catastrophic outbursts of the glacial lakes of the Altai Mountains. In: *Sovremennye geomorfologicheskie protsessy na territorii Altaiskogo kraya.* Biysk. P. 60–64. (in Russ.)
- Rudoy A.N. (2002). Glacier-dammed lakes and geological work of glacial superfloods in the Late Pleistocene, Southern Siberia, Altai Mountains. *Quat. Int.* V. 87. Iss. 1. P. 119–140.  
[https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(01\)00066-0](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(01)00066-0)
- Rudoy A.N., Baker V.R. (1993). Sedimentary effects of cataclysmic late Pleistocene glacial outburst flooding, Altai Mountains, Siberia. *Sediment. Geol.* V. 85. Iss. 1-4. P. 53–62.  
[https://doi.org/10.1016/0037-0738\(93\)90075-G](https://doi.org/10.1016/0037-0738(93)90075-G)
- Selivanov E.I. (1967). Neogene-Quaternary giant lakes in Transbaikalia and Northern Mongolia. *Doklady Akademii nauk SSSR.* V. 177. № 1. P. 175–178. (in Russ.)
- Selivanov E.I. (1968). Drained lakes. *Priroda.* № 3. P. 81–82. (in Russ.)
- Spirkin A.I. (1970). On the ancient lakes of the Darhad Basin. In: *Geology of the Mesozoic and Cenozoic of Western Mongolia.* Moscow: Nauka (Publ.). P. 143–150. (in Russ.)
- Stolz C., Hülle D., Hilgers A. et al. (2012). Reconstructing fluvial, lacustrine and aeolian process dynamics in Western Mongolia. *Zeitschrift für Geomorphologie.* V. 56. Iss. 3. P. 267–300.  
<https://doi.org/10.1127/0372-8854/2012/0078>
- Stone J.O. (2000). Air pressure and cosmogenic isotope production. *J. of Geophysical Res.* V. 105. Iss. B10. P. 23753–23759.  
<https://doi.org/10.1029/2000JB900181>
- Sugorakova A.M., Yarmolyuk V.V., Lebedev V.I. (2003). *Kainozoiskii vulkanizm Tuvy (Cenozoic volcanism of Tuva).* Kyzyl: TuvKOPR SO RAN (Publ.). 92 p. (in Russ.)
- Tsypukova S.S., Perepelov A.B., Demonterova E.I. et al. (2022). Two stages of the cenozoic alkaline-basalt volcanism in the Darhad depression (Northern Mongolia) – geochronology, geochemistry, and geodynamic consequences. *Geodinamika i tektonofizika.* V. 13. № 3. P. 1–15. (in Russ.).  
<https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-3-0613>

- Uflyand A.K., Ilyin A.V., Spirkin A.I. (1969). Baikal-type depressions in Northern Mongolia. *Byulleten' MOIP. Otdel geologicheskii*. V. 44. № 6. P. 5–22. (in Russ.)
- Uflyand A.K., Ilyin A.V., Spirkin A.I. et al. (1971). Main features of stratigraphy and conditions for the formation of Cenozoic formations in the Kosogol region (MPR). *Byulleten' MOIP. Otdel geologicheskii*. V. 46. № 1. P. 54–69. (in Russ.)
- Wagner G.A. (1998). Age determination of young rock and artifacts. Springer. 466 p.
- Zolnikov I.D., Deev E.V. (2013). Glacial superfloods on the territory of the Altai Mountains in the Quaternary period: formation conditions and geological features. *Earth's cryosphere*. V. 17. № 4. P. 74–82.
- Zolnikov I.D., Deev E.V., Kurbanov R.N. et al. (2023). Age of glacial and fluvioglacial deposits of the Chibitsky glaciocomplex and its dammed lake (Gorny Altai). *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. V. 54. № 1. P. 90–98. (in Russ.)  
<https://doi.org/10.31857/S0435428123010133>
- Zolnikov I.D., Mistryukov A.A. (2008). Chetvertichnye otlozheniya i rel'ef dolin Chui i Katuni (Quaternary sediments and relief of the Chuya and Katun valleys). Novosibirsk: Parallel (Publ.). 180 c.
- Zolnikov I.D., Novikov I.S., Deev E.V. et al. (2021). Facies composition and stratigraphic position of the quaternary Upper Yenisei sequence in the Tuva and Minusa depression. *Geologiya i geofizika*. V. 62. № 10. 1127–1138.  
<https://doi.org/10.2113/RGG20204183>
- Zolnikov I.D., Novikov I.S., Deev E.V. et al. (2023). The Last Glaciation and Ice-Dammed Lakes in the South-East Altai. *Led i Sneg*. V. 63. № 4. P. 639–651. (in Russ.)  
<https://doi.org/10.31857/S207667342304018X>