

УДК 551.435.1(235.222)

О ПРОИСХОЖДЕНИИ ГРЯДОВОГО РЕЛЬЕФА КУРАЙСКОЙ КОТЛОВИНЫ (ЮГО-ВОСТОЧНЫЙ АЛТАЙ) В СВЕТЕ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ И ГЕОРАДАРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

© 2022 г. С. С. Бричёва^{1,2,3,*}, Т. В. Гоников⁴, А. В. Панин², Е. В. Деев^{3,5}, В. М. Матасов^{6,7},
М. М. Дорошенков^{2,4}, А. Л. Энтин^{2,4}, Д. М. Лобачева⁴

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, Москва, Россия

²Институт географии РАН, Москва, Россия

³Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

⁴Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

⁵Институт нефтегазовой геологии и геофизики имени А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия

⁶Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

⁷Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ), Москва, Россия

*E-mail: bricheva@igras.ru

Поступила в редакцию 13.09.2021 г.

После доработки 05.05.2022 г.

Принята к публикации 15.07.2022 г.

Получены новые данные, позволяющие лучше понять механизм формирования грядового рельефа Курайской котловины. По материалам дистанционного зондирования были рассчитаны морфометрические показатели длин гряд и распределение их особых точек. Эти показатели статистически сравнивались с аналогичными показателями, оцененными для грядовых ландшафтов различного генезиса: катафлювиальное грядовое поле, образованное прорывом оз. Мизула на западе США, суперпаводковые гряды в долине Енисея, современные русловые гряды крупной реки в Индии, поле ребристой морены на юге Скандинавии, бэровские бугры Прикаспийской низменности, эрозионные рисунки Лёссового плато (Китай). Установлено, что по статистическому распределению морфометрических параметров гряды Курайской котловины близки к грядовым полям — аккумулятивным формам, образованным на дне водных потоков, и значительно отличаются от моренных и эрозионных геоморфологических ландшафтов. Их внутреннее строение, определенное по данным георадиолокации, типично для русловых гряд на дне рек — в их поперечном сечении однозначно выделяются одна или несколько косослоистых пачек с падением слоев в направлении потока. Полученные результаты позволяют аргументированно оспорить ледниковую и остаточно-эрозионную гипотезы формирования гряд и подтвердить их происхождение в результате действия течения, формировавшегося при спуске ледниково-подпрудного озера, занимавшего Курайскую впадину. В ходе исследования были установлены новые детали механизма формирования гряд. Перепад высот между южной и северной перифериями грядового поля составляет 80 м. Выявлена связь размеров и внутреннего строения гряд с их положением, что может быть связано с глубиной формировавшегося их течения. При малых глубинах на юге котловины формировались малые гряды, сложенные одной косослоистой пачкой отложений в ходе одного импульса. В северной части при больших глубинах поток двигался несколькими импульсами, что приводило к формированию крупных гряд, состоящих из нескольких косослоистых пачек отложений. Чтобы перепад высот влиял на процесс формирования гряд, средняя глубина потока не должна превышать 200–300 м, это позволяет предположить, что гряды формировались на финальной стадии спуска озера. Впервые установлено наличие в составе крупных гряд северной части поля покровных пачек отложений с обратным направлением слоистости, что указывает на возможность реверсивного движения потока на конечном этапе формирования гряд. Это свидетельствует о росте неустойчивости течения и о появлении его быстрых разнонаправленных пульсаций на последней стадии осушения озера.

Ключевые слова: Горный Алтай, гигантская рябь течения, прорыв ледниковых озер, суперпаводки, ландшафтный рисунок, георадиолокация

DOI: 10.31857/S0435428122040034

ВВЕДЕНИЕ

На дне Курайской котловины (Юго-Восточный Алтай) имеются поля субпараллельных, ино-

гда слегка изогнутых гряд, располагающихся на разных высотах и сложенных валунно-галечным материалом (рис. 1). Наиболее крупное грядовое

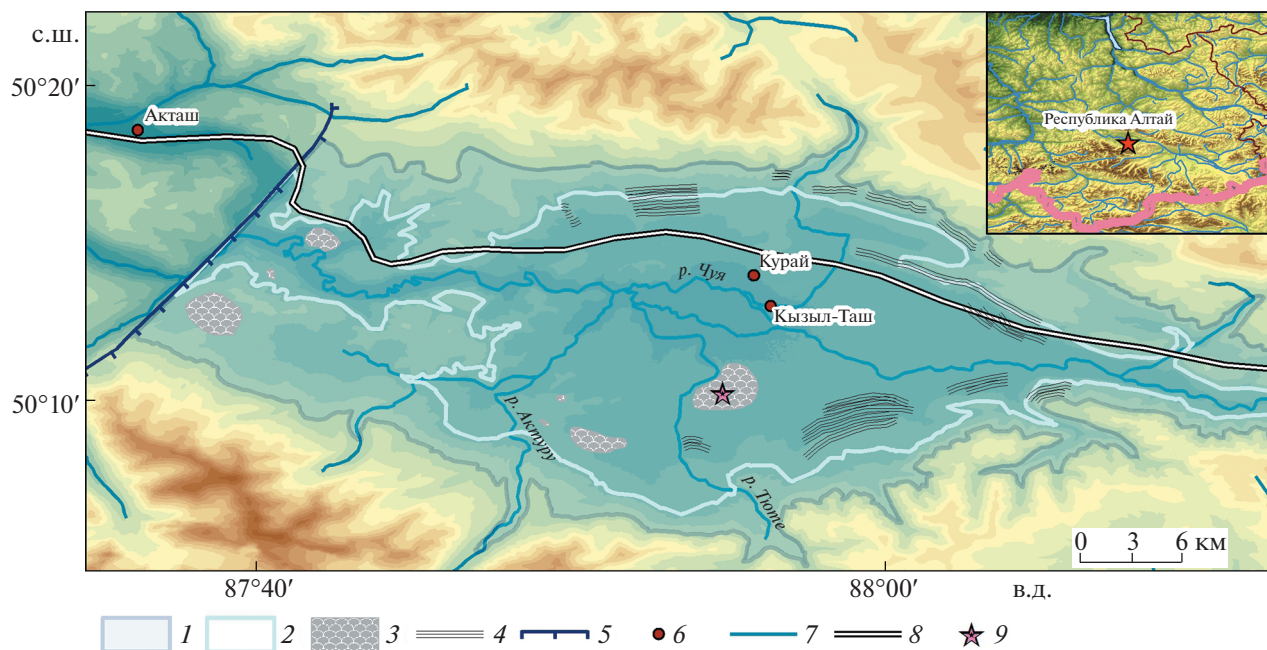


Рис. 1. Гипсометрическая карта Курайской котловины с элементами палеогеографии. Границы палеозера с уровнем, м: 1 – 2200, 2 – 1750; 3 – грядовые поля; 4 – береговые линии; 5 – предполагаемое положение ледовой дамбы; 6 – населенные пункты; 7 – реки; 8 – Чуйский тракт; 9 – участок работ.

Fig. 1. Hypsometric map of the Kuray Depression with elements of palaeogeography. Paleolake levels, m: 1 – 2200, 2 – 1750; 3 – gravel dunes; 4 – stadial lake shorelines; 5 – potential ice dam boundary; 6 – settlements; 7 – rivers; 8 – Chuya highway; 9 – work area.

поле, за которым в литературе закрепилось название “Курайское”, располагается на юге котловины. Оно имеет размеры около 4 км в длину и 3 км в ширину. Гряды сформировались на наклоненной к северу поверхности валунно-галечных отложений внутренней дельты р. Тюте – левого притока р. Чуи. Происхождение грядового рельефа на протяжении нескольких десятилетий остается дискуссионным. По мнению одних авторов, данное грядовое поле сформировалось в результате воздействия на дно впадины катастрофического потока, образовавшегося при прорыве плотины ледниково-подпрудного озера в Чуйской котловине (Рудой, 1984, 2005; Бутвиловский, 1985, 1993; Барышников, 1992; Rudoy, Baker, 1993; Гросвальд, 1999; Инишев и др., 2015), или течений, возникших при быстром опорожнении подпрудного озера, занимавшего Курайскую котловину в конце позднего плейстоцена (Carling et al., 2002; Herget, 2005; Bohorquez et al., 2019; Agatova et al., 2020), в период последней дегляциации после глобального ледникового максимума около 20 тыс. л. н. (рис. 1). Уровень озера, согласно находкам фрагментов наиболее высоких озерных террас на бортах котловины, по (Bohorquez et al., 2019), достигал абс. отметок около 2200 м (рис. 1), глубина – до 700 м, а пиковые расходы воды при прорыве ледяной дамбы в долине Чуи – 10.5 млн м³/с. По предположению (Поздняков, 2019; Поздняков,

Пупышев, 2019), уровень последнего озера располагался на абс. отметке 2133 м абс., механизм формирования ледовой дамбы был наледным, и, постепенный спуск водоема занял несколько лет. Напротив, в (Agatova et al., 2020) авторы полагают, что уровень последнего озера, существовавшего около 19 тыс. л. н., достигал абс. отметки лишь 1650 м, а спуск был одномоментным и катастрофическим. К выводу, что в районе последнего ледникового максимума и в течение всей морской изотопной стадии 2 (МИС 2) уровень озера не мог превышать абс. отметки 1750 м (рис. 1), пришли и исследователи в работах (Деев и др., 2022; Зольников и др., 2021a), однако, по их мнению, спуск этого озера катастрофическим не был. В качестве механизма катастрофического спуска озера в работе (Bohorquez et al., 2019) предложена модель перелива через ледовую плотину с ее быстрым разрушением за счет термоэрозии, а в работах (Окишев, Бородавко, 2001; Бородавко, 2003) предлагается механизм постепенного спуска путем подледного стока с выработкой глубокого эрозионного канала в скальном основании.

Ряд исследователей предлагают объяснения формирования курайских валунно-галечных гряд, не связанные со спуском ледниково-подпрудных озера: считают их флювиальными формами – грядами мощной пра-Чуи (Лунгерсгаузен, Раковец, 1958); ребристой мореной (Борисов,

Минина, 1973, 1998; Окишев, 1982); формами поверхности зандровых конусов, образовавшимися в ходе таяния долинных ледников (Зыкин и др., 2011); остаточными формами эрозионного расчленения флювиогляциальных конусов (Девяткин, 1965; Поздняков, Хон, 2001; Поздняков, Окишев, 2002), причем пути заложения эрозионных каналов могли быть частично predetermined процессами криогенного пучения и растрескивания (Поздняков, Тимофеев, 2007; Поздняков и др., 2020). В последней работе группы томских исследователей (Поздняков и др., 2022, с. 157) курайские гряды охарактеризованы как “откопанная геоморфологическая криптоструктура”: предполагается, что они образовались в доозерный период как элементы наземных флювиогляциальных дельт местных рек, затем были частично погребены тонкозернистыми осадками на озерном этапе, а после спуска озера — откопаны эрозионной деятельностью местного стока. Представленное выше разнообразие мнений показывает, что определение достоверного механизма формирования Курайского грядового поля имеет большое значение для реконструкции четвертичной истории Горного Алтая.

Изучение особенностей морфологии успешно применяется для уточнения генезиса и особенностей развития различных грядовых структур: куполовидных дюн (Qian et al., 2020), подводной ряби течения (Li et al., 2014), дюнных полей на Марсе (Silvestro et al., 2012). Существенную информацию в этих исследованиях получают при помощи дистанционного зондирования (снимки с космических аппаратов, пилотируемых или беспилотных носителей). Применение математического аппарата для изучения морфологической структуры ландшафта позволяет количественно оценить геометрические свойства объекта и особенности пространственного расположения его составных частей (Викторов, 2006). Форма, протяженность, ширина и высота гребня гряд позволяют описать пространственное разнообразие ландшафтов, классифицировать их по этим признакам и судить о сходстве происхождения различных объектов.

Анализ морфометрических показателей ландшафта дополняется изучением внутренней структуры объекта. Прямые методы исследования, такие как бурение, шурфовка и тренчинг, не могут применяться на больших территориях из-за их высокой трудоемкости и стоимости. Результаты их локальны и зачастую лишь ставят новые вопросы перед исследователями. Как следствие, здесь находят свое применение геофизические методы (Schrott, Sass, 2008; Van Dam, 2012). Для изучения гряд Курайской котловины мы использовали метод георадиолокации, основанный на излучении высокочастотных электромагнитных импульсов в исследуемую среду и получении от-

клика в значениях амплитуды и времени прихода отраженного сигнала (Владов, Судакова, 2017). Этот геофизический метод отличается высокой разрешающей способностью, однако его глубинность в большинстве четвертичных отложений ограничивается первыми десятками метров. При помощи георадиолокации возможно определять внутреннее строение грядовых форм рельефа (Ground Penetrating Radar in Sediments, 2003; Botha et al., 2003; Gómez-Ortiz et al., 2009). В работе (Carling et al., 2016) приведены результаты применения георадиолокации для изучения стратиграфии непосредственно гряд Курайской котловины. Указывается на возможность использования метода для выделения границ изменения условий осадконакопления, участков размыва и эрозии, выделения пачек внутри гряд и построения их относительной хронологии. Однако изученная в упомянутой работе территория была ограничена пятью фрагментами гряд на западной оконечности поля, что недостаточно для понимания процесса, сформировавшего данный ландшафт. Аналогично ограниченное число гряд было проанализировано и в более поздней статье (Панин и др., 2016).

Целью настоящей работы является уточнение механизма формирования грядового рельефа на дне Курайской котловины на основании анализа пространственного рисунка грядового поля и сравнения его с объектами-аналогами, а также внутреннего строения гряд по георадарным данным.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования. Курайская котловина расположена в пределах юго-восточной части Горного Алтая. Она имеет длину 20 км при ширине 16 км. Днище котловины сложено преимущественно аллювиальными, пролювиальными и иными флювиальными образованиями, озерно-ледниковыми и эоловыми отложениями четвертичного времени. В пределах Курайской котловины известно несколько грядовых полей, расположенных на разных высотах (рис. 1). Для данного исследования был выделен однородный участок (рис. 2) с 80 грядами, средняя длина (протяженность гребня) которых составила 256 м.

Для сравнения морфологической структуры гряд в исследуемой котловине с аналогичными морфологическими структурами было выбрано шесть объектов различного генезиса (рис. 3), соответствующего высказанным разными авторами гипотезам происхождения курайских гряд, которые можно разделить на три группы: (1) гряды водных потоков; (2) эрозионные останцы; (3) формы моренного рельефа. Первым объектом сравнительного анализа послужило грядовое поле около оз. Мизула (США). Данное озеро занимало обширные площади в Североамериканских Кор-

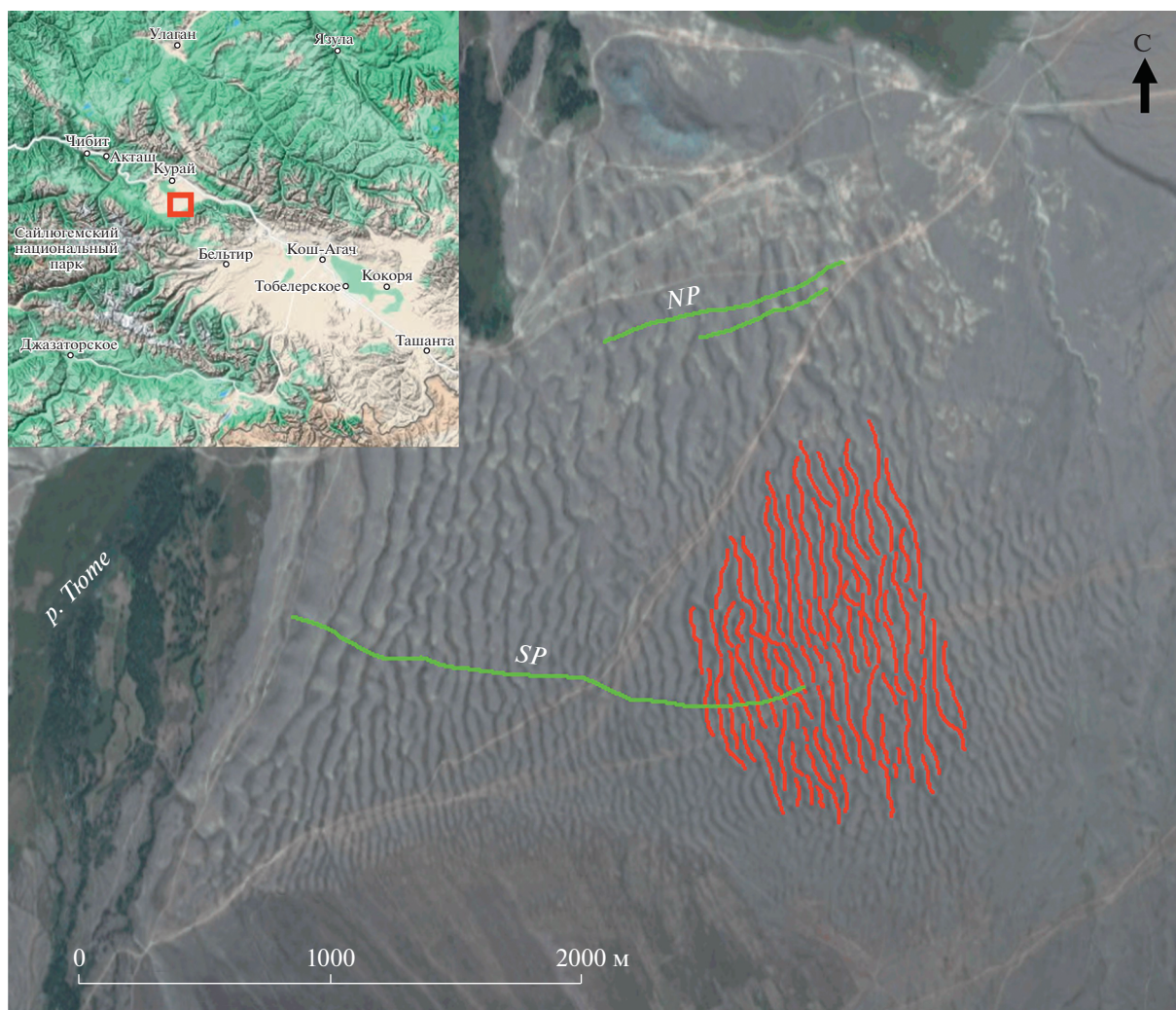


Рис. 2. Грядовый рельеф Курайской котловины (снимок Yandex, во врезке – Google Terrain Hybrid). Выделены гряды, для которых рассчитывались морфометрические показатели и линии георадарных профилей, пересекающих гряды в северной (NP) и южной (SP) частях поля.

Fig. 2. Satellite image (Yandex, Google Terrain Hybrid – in sidebar) of the dune field in the Kuray Depression. Dunes for which morphometric indicators were calculated are highlighted. Lines mark the GPR profile's location in northern (NP) and southern (SP) part of the field.

дильерах на протяжении плейстоцена и возникло из-за подпруживания речных долин Кордильерским ледниковым щитом. Следы катастрофических сбросов из этого озера сохраняются в современном рельефе в виде полей гигантской ряби в днищах долин и скэбленде Колумбийского базальтового плато (Bjornstad, 2021). Ландшафтный рисунок данного объекта также субпараллельно-полосчатый. На нем было выделено 89 гряд со средней протяженностью гребней 450 м (рис. 3 (а)).

В качестве второго объекта сравнения была выбрана ребристая морена около оз. Оснен (Швеция) на юге Скандинавского п-ова в зоне распространения моренных отложений плейстоценовых оледенений, перекрывающих кристаллические породы Балтийского щита. Ледниковое

происхождение этих гряд ни у кого из исследователей сомнения не вызывает (Möller, Dowling, 2018). Структура морфологического рисунка не столь правильная, как у двух рассмотренных выше объектов, но также субпараллельно-полосчатая (рис. 3 (б)). Поскольку гряды плохо просматриваются на космических снимках, мы использовали цифровую модель рельефа из вышеуказанной статьи, полученную на основе облака точек воздушного лазерного сканирования. На ее основе был выделен однородный участок с 90 моренными грядами со средней протяженностью гребней 633 м.

Гряды на террасах Енисея (рис. 3 (в)) были выбраны как пример форм, образованных суперпаводковым водным потоком (Komatsu et al., 2009;

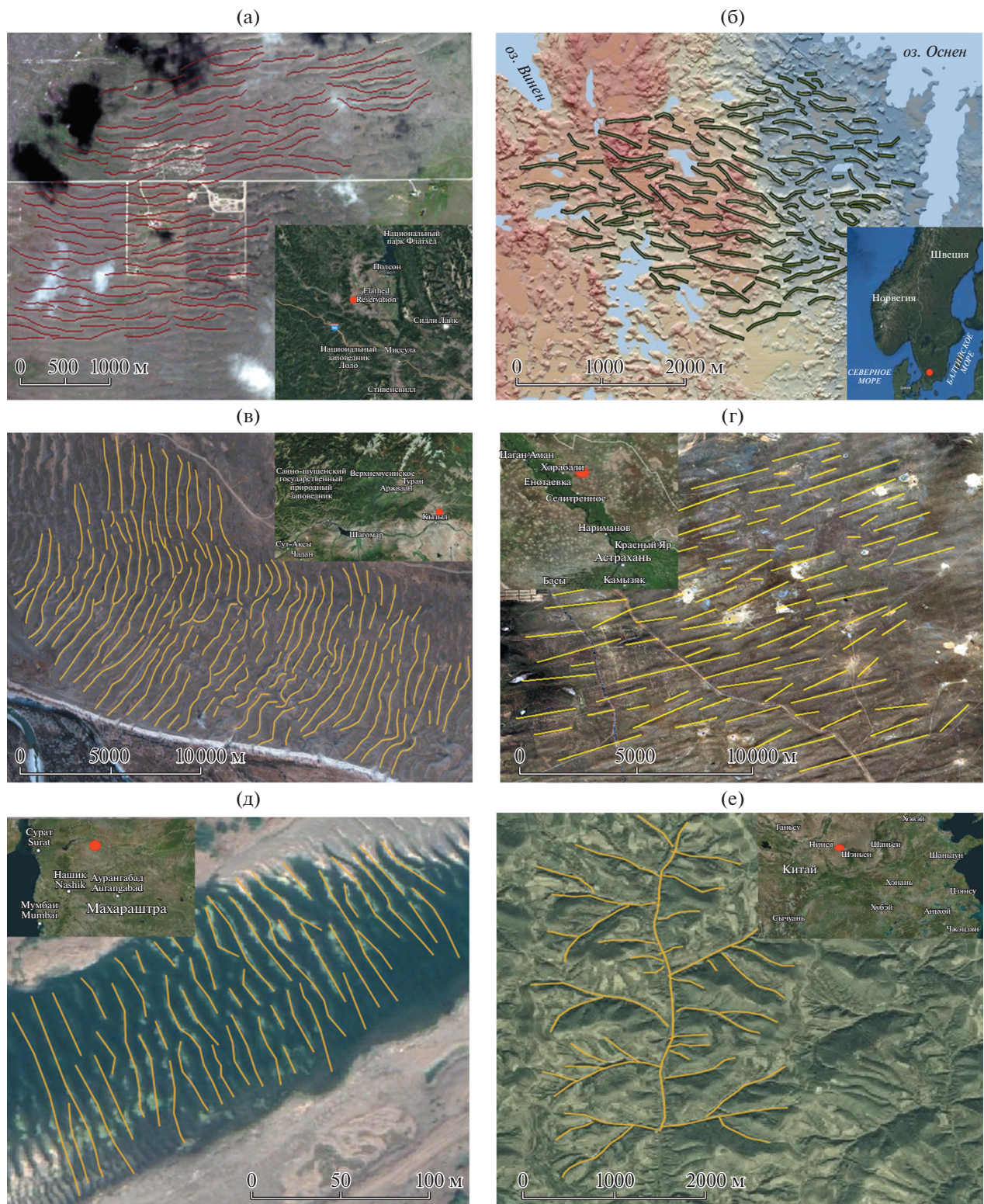


Рис. 3. Объекты-аналоги с выделенными грядами, для которых рассчитывались морфометрические показатели: (а) – грядовое поле в окрестностях оз. Мизула, бассейн Камас-Прейри, штат Монтана, США; (б) – ребристая моренная равнина вблизи оз. Оснен, Швеция (по (Möller, Dowling, 2018)); (в) – паводковые гряды на р. Енисей, Россия; (г) – бэрзовские бугры Прикаспийской низменности, Россия; (д) – русловые гряды р. Тапи, Индия; (е) – эрозионные рисунки Лёссового плато, Китай. Снимки GeoEye, во врезках – фрагменты снимков Yandex.

Fig. 3. Reference objects with highlighted dunes for which morphometric indicators were calculated: (a) – dune field near Lake Missoula, Camas Prairie Basin, Montana, USA; (b) – ribbed moraine plain near Åsnen Lake, Sweden (by Möller, Dowling, 2018); (v) – flood ridges on the Yenisei River, Russia; (r) – Baer knolls of the Caspian Depression, Russia; (d) – ripple marks in the Tapi River, India; (e) – erosion patterns of the Loess Plateau, China. Satellite images by Yandex and GeoEye.

Зольников и др., 2021б). По снимку GeoEye была выделена 131 гряда со средней протяженностью гребней 236 м.

Следующий объект сравнения — бэровские бугры Северного Прикаспия (рис. 3 (г)). Генезис бэровских бугров до сих пор является предметом дискуссий. В частности, существует версия формирования их под действием плоскостных потоков в мелководной лагуне Северного Каспия (Лобачева и др., 2021). Для сопоставления с курайскими грядами по снимку GeoEye был выбран участок на левобережье Волги в самых северных ареалах распространения бугров. Здесь изначальная структура бугров меньше всего изменена экзогенными процессами. В пределах участка было выделено 93 гряды со средней протяженностью гребней 1952 м.

Мы также провели сравнение с русловыми грядами на примере русла р. Тапи, Индия (рис. 3 (д)). На участке сезонного обмеления русла по снимку GeoEye было выделено 72 гряды со средней протяженностью гребней 59 м.

В завершение для сравнения с ландшафтным рисунком эрозионного происхождения был выбран участок Лёссового плато Китая. В данном случае объектами анализа являлись 125 эрозионных врезов со средней длиной 717 м, выделенные и измеренные по космическому снимку GeoEye (рис. 3 (е)).

Съемка рельефа. Детальная цифровая модель рельефа дна Курайской котловины получена путем автоматизированной фотограмметрической обработки массива около 900 снимков с БПЛА DJI Phantom 4 Pro. Съемка выполнена с высоты 350 м с перекрытием между снимками 80% при ясной погоде. Обработка массива аэрофотоснимков выполнена в Agisoft Metashape с использованием наземных опорных точек, координаты которых были определены методом дифференциальных ГНСС-измерений в режиме статике. В результате обработки была получена цифровая модель рельефа с разрешением 0.4 м. С использованием этой модели и снимков WorldView-1 с разрешением 1 м, предоставляемых сервисом Google Earth, был проанализирован ландшафтный рисунок грядового поля Курайской котловины: оценены морфометрические показатели гряд в Курайской котловине — протяженности гребней и особые точки¹.

Морфометрический анализ. Выбор показателей внешней структуры был обусловлен грядовым строением рисунка — в математической морфологии такие объекты характеризуются параметром длины гряды и пространственным распреде-

лением особых точек (Викторов, 2006). Именно длина (протяженность гребня, которая в некоторых случаях называется “диаметром” гряды) является первичным показателем размера исследуемых форм, остальные параметры (периметр, плотность расположения, площадь), как правило, являются ее производными. На данный момент это общепринятый подход к изучению распределения частей рисунка в пространстве. Аналогичная система особых точек используется и в современном моделировании эоловых процессов (Zhang et al., 2018). Анализ показателей длин гряд и распределения их особых точек проводился в программе “Statistica”. Анализ заключался в проверке их на соответствие законам распределения на основе критерия Пирсона. В данном методе математической статистики формулируется нулевая гипотеза, заключающаяся в том, что анализируемый показатель подчиняется конкретному статистическому распределению, и устанавливается уровень значимости этой гипотезы (p -критерий). В нашем случае он составлял 0.05. При получении значения p -критерия ниже 0.05 нулевая гипотеза отвергалась, т.е. считалось, что анализируемый показатель данному виду распределения не подчиняется. Для непрерывного показателя длин проверялось соответствие нормальному, логнормальному, экспоненциальному и гамма-распределению. Для дискретного показателя числа особых точек проверялось соответствие распределению Пуассона. Проверка особых точек на соответствие закону Пуассона проводилась исходя из того, сколько таких точек попадает в сто случайно расположенных окружностей. Размер площадей окружностей определялся как отношения анализируемой площадки к числу выделенных гряд для получения наиболее объективно равномерной картины.

Георадиолокация. В ходе геофизических работ методом георадиолокации мы заложили на дне Курайской котловины профили, пересекающие два участка грядового поля — 15 фрагментов гряд в северной части и 35 фрагментов в южной (рис. 2). Общая длина профилей составила 4 км. Мы использовали георадар “ОКО-2” (Логис-Геотех, Россия) с антенным блоком 250 МГц. В слабо поглощающих сухих песчано-галечных отложениях при средней длине волны излучения 0.5 м разрешающая способность этой антенны не менее 0.2 м. Средняя скорость распространения электромагнитной волны в этой породе, определенная по методу гипербола, составила 13.2 см/нс. Глубинность исследования достигала 12 м. Профили пересекали гряды под прямым углом в направлении с запада на восток. Обработка проводилась в программе Prism2.7 при помощи следующих процедур: смещение нуля записи, полосовая фильтрация, вычитание среднего, коррекция амплитуд и ввод рельефа. Для сравнения с морфо-

¹ Особые точки морфологической структуры включают точки начала (северное замыкание), окончания (южное замыкание) и пересечения гряд (точка, где гряды смыкаются).

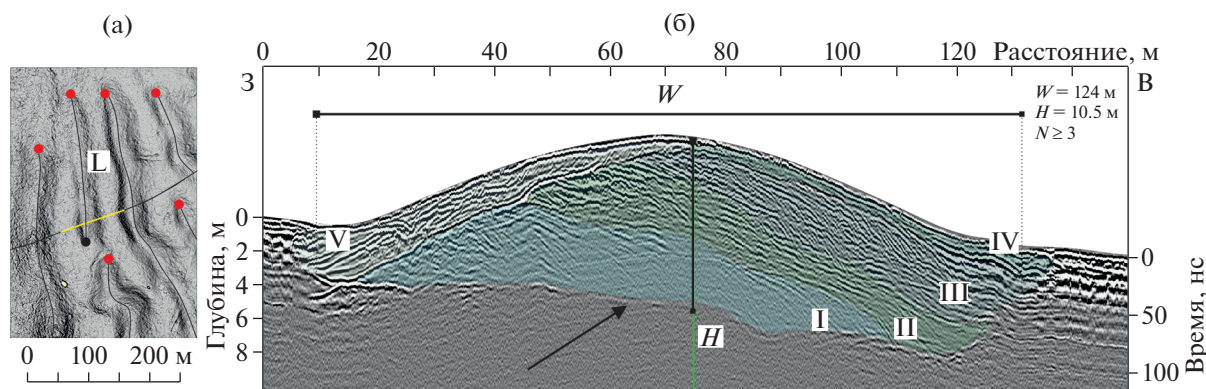


Рис. 4. (а) — Показатели внешней структуры ландшафта на примере фрагмента Курайского грядового поля: L — длины гряд; особые точки: красные — краевые, черные — пересечений. (б) — Показатели внутренней структуры на примере радарограммы одной из гряд в северной части поля: H — глубина цоколя, W — ширина гряды, N — число пачек. Стрелкой отмечено отражение от цоколя гряды. Значения показателей приведены в правом верхнем углу. I–V — пачки отложений.

Fig. 4. (a) — Morphometric indices on the Kuray dune field's fragment: dune length L ; special points: marginal (red) and intersection points (black). (б) — Morphological indices on the GPR profile fragment from the dune in the northern part of the field: H (basement depth), W (dune's width), N (number of packages). The arrow marks the reflection from the dune's basement. Values of indices are given in the upper right corner. I–V — sedimentary packages.

метрическими показателями были выбраны показатели внутренней структуры, которые возможно оценить по радарограммам. Для каждой гряды в отдельности были оценены: глубина основания (цоколя) гряды H (не является эквивалентом высоты гряды — разности высот между гребнем и межгрядовым понижением), ширина гряды W (эквивалент шага, или половины длины волны) и число пачек отложений N (рис. 4). Цоколь гряды на радарограмме выделяется в виде псевдогоризонтальной оси синфазности, в межгрядовых понижениях поднимающейся к поверхности, а под центром гряды достигающей максимальной глубины H . Ширина (шаг) гряды оценивалась как расстояние по горизонтали между границами соседних межгрядовых понижений. Внутреннее строение гряд представляло собой несколько георадарных комплексов — областей, согласно (Старовойтов, 2008), характеризующихся схожим амплитудным и частотным составом, а также одинаковым углом наклона слоистости. Эти комплексы были проинтерпретированы как разновозрастные пачки отложений. Поскольку для многих гряд точный подсчет количества пачек затруднителен, мы выбрали только три значения для этого показателя N : 1 (одна пачка), 2 (можно однозначно выделить две пачки отложений), ≥ 3 (три и более пачек). Оценивались как абсолютные значения параметров для каждой гряды, так и средние для северной и южной частей поля, а также среднеквадратичные отклонения. Этот анализ позволил нам выделить несколько типов гряд и оценить их пространственное распределение.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Структура грядового поля по результатам морфометрического анализа. Результаты анализа показателя длин гряд являются наиболее интересными с точки зрения изучения особенностей морфологической структуры. В табл. 1 представлены расчеты p -критерия для четырех законов распределения. Значимое соответствие логнормальному распределению отмечается для грядовых структур Курайской котловины, Мизулы, Енисея, бэровских бугров и русла р. Тапи. Остальные распределения (нормальное, гамма, экспоненциальное) не подходят для описания вариации длин этих грядовых форм. Для участка Оснен, представляющего собой ребристую морену, не выявлено соответствия ни одному из распределений, что указывает на отличие его морфологического строения от двух других объектов. Аналогично не выявлено закономерностей для эрозионного рисунка Лёссового плато. Обнаружена высокая степень сходства ландшафтных рисунков курайских и енисейских гряд, выраженная в близости средних показателей и логнормальном распределении длин гряд.

Результаты анализа распределения числа особых точек представлены 19 выборками (табл. 2). Для 14 выборок наблюдается соответствие распределению Пуассона с показателями p -критерия от 0.075 до 0.654. Выявленная закономерность характерна для всех типов особых точек (начал, окончаний и пересечений). Выбивается из общей картины ребристая морена Оснен, у которой точки пересечений не распределены по закону Пуассона (табл. 2, p -критерий = 0.000). На русловой яриби р. Тапи распределения Пуассона не выявле-

Таблица 1. Проверка показателя длины гряд на соответствие законам статистического распределения*
Table 1. Checking the indicator of the length of the ridges for compliance with the laws of statistical distribution*

Объект	Объем измерений	Средняя длина гряд**, м	Уровень значимости (<i>p</i> -критерий) на соответствие распределению			
			нормальное	логнормальное	гамма	экспоненциальное
Курайская котловина	80	256 ± 157	0.002	0.992	0.000	0.000
Мизула	89	450 ± 214	0.000	0.598	0.000	0.000
Оснен	138	801 ± 477	0.000	0.003	0.000	0.000
Бэровские бугры	93	1952 ± 973	0.239	0.502	0.000	0.000
Енисей	131	236 ± 145	0.063	0.090	0.000	0.000
Тапи	72	59 ± 33	0.090	0.540	0.000	0.000
Лессовое плато	125	717 ± 409	0.000	0.000	0.000	0.000

*Жирным шрифтом выделены случаи соответствия.

**Для грядовых форм — длина гребней, для эрозионных (Лёссовое плато) — длина тальвегов.

Таблица 2. Проверка статистических параметров особых точек гряд на соответствие распределению Пуассона*
Table 2. Checking the statistical parameters of special ridge points for compliance with the Poisson distribution*

Объект	Тип точек	Объем измерений	<i>p</i> -критерий соответствия распределению Пуассона
Курайская котловина	начала	100	0.113
	окончания	100	0.298
	пересечения	100	0.432
Мизула	начала	100	0.301
	окончания	100	0.075
	пересечения	100	0.511
Оснен	начала	100	0.374
	окончания	100	0.654
	пересечения	100	0.000
Бэровские бугры	начала	100	0.073
	окончания	100	0.188
	пересечения	100	0.045
Енисей	начала	100	0.295
	окончания	100	0.490
Тапи	начала	100	0.000
	окончания	100	0.005
Лёссовое плато	начала	100	0.061
	окончания	100	0.143
	пересечения	100	0.007

*Жирным шрифтом выделены случаи соответствия.

но предположительно из-за слишком малого размера и ограниченности объекта.

Внутреннее строение гряд по результатам георадиолокации. Полученные радарограммы дают хорошее представление об особенностях внутреннего строения гряд. Это видно на примере од-

ной из северных гряд, представленной на рис. 4. Эта гряда — одна из самых высоких, ее цоколь располагается на глубине около 10.5 м от поверхности. В толще отложений, перекрывающей цоколь, ярко выражена слоистость, слои наклонены преимущественно с запада на восток. В толще

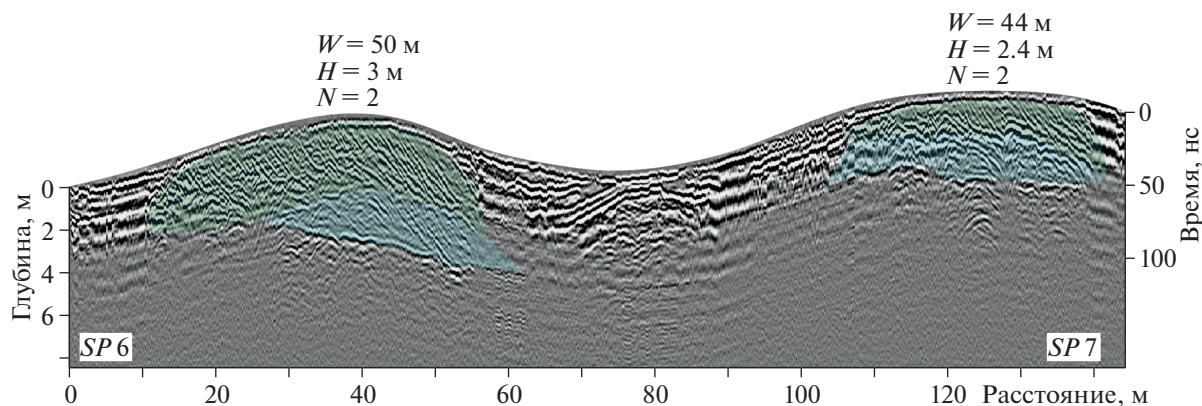


Рис. 5. Фрагмент поперечного георадарного профиля, пересекающего две гряды в южной части поля. Значения показателей внутреннего строения приведены над грядами. Условные обозначения см. рис. 4. SP6, SP7 — идентификаторы гряд.

Fig. 5. Fragment of GPR profile across two dunes in the southern part of the field. The sediment packages are highlighted in colour. Values of morphological indices are shown above the dunes. Symbols — see Fig. 4. SP6, SP7 — dunes' identifiers.

возможно выделить несколько георадарных комплексов, отличающихся по волновой картине. Эти комплексы мы интерпретируем как пачки отложений, возникшие из-за смены гидродинамики водной среды, а возможно, и как отложения различного возраста и генезиса (флювиальные, озерные, эоловые). Наиболее глубоко залегающая пачка I имеет сглаженную волновую картину — отражения внутри слоя единичны и сосредоточены вблизи западного края гряды (на расстоянии 20–50 м от начала профиля). По виду они напоминают гиперболы дифракции, которые образуются при огибании электромагнитной волной локальных препятствий (Старовойтов, 2008). На Алтае такими препятствиями могут быть крупные обломки (глыбы). Мощность этой пачки составляет от 1 до 5 м. Сверху к пачке I прилегает пачка II с ярко выраженной слоистостью. Слои падают с запада на восток под углом около 7°. Выше залегает пачка III, отличающаяся более крутым углом наклона слоистости, который достигает 25°, при том, что пологие слои, подобные пачке II, здесь также сохраняются. Пачка IV облегает восточный склон гряды, в ней нет слоистости, мощность менее 1 м; скорее всего она представлена склоновыми отложениями. Пачка V покрывает западный склон гряды, она имеет переменную мощность: возле вершины мощность минимальна, а у подножия достигает 3.5 м. Пачка неоднородна, в ней присутствует несколько границ, возможно, связанных со склоновыми процессами. Также обращает на себя внимание слоистость в направлении, обратном основной толще гряды, — слои падают с востока (В) на запад (З). Пачка V в том или ином виде присутствует на всех изученных грядах в северной части Курайского поля. Для более точной интерпретации данных георадара требуется заверка тренчингом или бурением.

Анализ внутреннего строения был проведен таким образом для всех изученных фрагментов гряд. Цоколь большинства гряд представляет собой контрастную отражающую границу на радарограмме. В ряде случаев он имеет наклон до 3° в восточном направлении (рис. 4, 5). Контрастность (значение амплитуды отраженного сигнала) может меняться вдоль границы цоколя, становясь слабее в самом глубоком месте. Это характерно для более высоких гряд на севере (рис. 4) и связано с затуханием сигнала в среде. В межгрядовых понижениях граница цоколя закономерно стремится к поверхности, однако по данным георадиолокации она нигде не выходит на поверхность. Межгрядовые ложбины имеют характерную волновую картину, связанную с понижением частоты отраженного сигнала: оси синфазности имеют большую ширину, глубинность проникновения сигнала минимальна. Эти ложбины заполнены глинистыми склоновыми отложениями (Carling, 2009), чем и объясняется падение частоты отраженного сигнала. Объяснение снижения частоты сигнала повышенной увлажненностью вряд ли имеет под собой основание, поскольку Курайская котловина характеризуется засушливым климатом, а валунно-галечные отложения хорошо дренируются.

Среднее значение показателя H (глубина цоколя) в северной части составило 6.8 м, в южной — 2.8 м. При этом среднеквадратичное отклонение в южной части (2.2) значительно выше, чем в северной (1.7) — разброс высот на юге больше. Это хорошо заметно на диаграмме (рис. 6), которая изображает значения показателя H для северных и южных гряд. Северный участок грядового поля более однородный, тогда как на южном выделяется три типа гряд (рис. 6 (в)). Первый тип отмечается на западной стороне поля, где гряды близ-

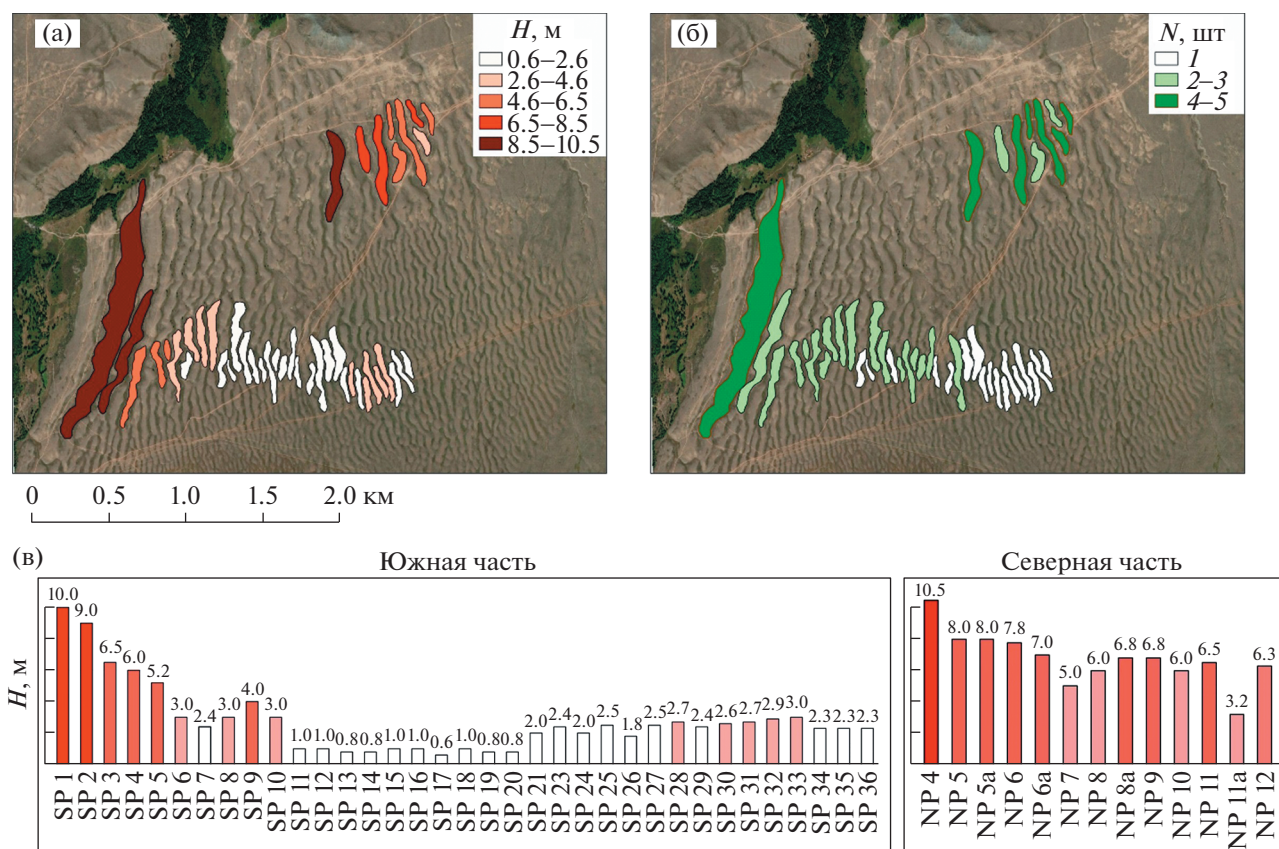


Рис. 6. Пространственное распределение значений показателей внутренней структуры гряд по данным георадиолокации: (а) — H , глубина подола; (б) — N , число пачек; (в) — диаграммы значений показателя H для гряд в южной (SP) и северной (NP) частях поля. Цвета соответствуют значениям показателя H .

Fig. 6. Spatial distribution of morphological indices based on GPR data: (a) — H , basement depth; (б) — N , number of packages; (в) — diagrams of H values for dunes in the southern and northern parts of the field. Colours corresponding to H values.

ки к расположенным на севере поля, — величина показателя H колеблется от 3 до 10 м. Второй тип расположен в средней части южного участка, это слабо выраженные в рельефе гряды, их высота редко превышает 1 м. Третий тип занимает промежуточное положение между типами I и II. Ширина гряд в среднем составляет 40 м и практически не связана с их высотой. Связь наблюдается только для крайней западной гряды, отличающейся значительными размерами по обоим показателям. Неоднородность значения показателя H говорит о различной интенсивности процесса, формировавшего гряды, в разных частях котловины.

В структуре северных гряд фиксируется наличие трех и более пачек, залегающих несогласно, что может говорить о существенной смене гидродинамических условий. В южной части поля в половине гряд отмечается только одна пачка, и лишь в четырех крайних западных грядах их зафиксировано три и более (рис. 6 (б)).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Количественное изучение морфологии гряд Курайской котловины и сравнение их с объектами-аналогами позволило выявить следующие закономерности:

- Распределения длин (протяженностей) гребней курайских гряд соответствуют логнормальному распределению, как и гигантская рябь суперпаводков оз. Мизула, а также гряды, сформированные водными потоками на дне речных долин и в руслах рек, — на террасе Енисея и в русле Тапи, и бэровские бугры Прикаспия (табл. 1). Сравнение курайских гряд с ландшафтом ребристой морены Оснен и эрозионным рельефом Лёссового плато обнаружило существенные различия пространственного рисунка. Поскольку все поточные объекты анализа продемонстрировали логнормальное распределение длин гребней гряд, можно утверждать, что рисунок рельефа дна Курайской котловины говорит в пользу его поточного генезиса.

- Точки начал и окончаний гряд везде, кроме русла Тапи, распределяются в пространстве по закону Пуассона (табл. 2), что говорит о высокой внутренней однородности структуры грядовых полей в пределах каждого изученного объекта. Это может указывать на единый в геологическом смысле возраст форм и однородность рельефообразующих процессов в каждом отдельном грядовом поле. Гряды Курайской котловины и Мизулы соответствуют распределению Пуассона по всем особым точкам, что может указывать на наиболее близкие механизмы формирования этих грядовых полей. Близкие значения получены и для гряд Енисея, но рисунок этого грядового поля не позволил выделить достаточное для статистического анализа число точек пересечения. По всей видимости, это связано со спецификой формирования гряд в потоке, ограниченном бортами долины. Несоответствие закону Пуассона точек пересечения гряд на участке Оснен отличает его от Мизулы, Курайской котловины и других объектов анализа, что свидетельствует об отличии механизма формирования этого грядового поля от остальных рассмотренных. Для гряды в русле р. Тапи не выявлено пуассоновского распределения ни для одного типа особых точек из-за слишком малого размера и ограниченности этого объекта.

- Изучение внутреннего строения гряд Курайской котловины методом георадиолокации позволило обнаружить несколько косослоистых пачек отложений. Эти пачки лежат на цоколе гряды, хорошо различимом во всех обследованных грядах. Эти свойства характерны для дюн, образующихся на дне водных потоков, и не характерны для морены, а также и для остаточно-эрозионных гряд, которые должны были бы унаследовать характер слоистости от исходного, рассеченного эрозией геологического тела — обширного аллювиального конуса (внутренней дельты).

Описанные результаты морфометрических и геофизических исследований говорят в пользу потокового генезиса изученных гряд и подтверждают предложенное для них в литературе название “гигантской ряби течения” (Рудой, 1984, 2005). Тот факт, что единое грядовое поле занимает участок с перепадом высот порядка 80 м (от 1510 м абс. на севере до 1590 м абс. на юге поля), говорит о том, что оно формировалось на дне водной толщи с глубиной не менее 80 м, что в условиях внутригорной котловины нельзя объяснить обычными процессами стока воды. Транспорт галечно-валунного материала соответствующей крупности с формированием грядовых форм требует скоростей течения в интервале 1.5–8 м/с (Carling, 1996). В математических моделях в качестве условия формирования гряд принимается осредненная по толще потока скорость течения 4–5 м/с. По данным моделирования в работе (Инишев и др.,

2015), такие скорости течения имели место на этапе спуска озера, когда его глубина в районе изучаемого курайского грядового поля составляла порядка 400 м. Более сложная модель из работы (Bohorquez et al., 2019) показывает три “грядообразующих” пика скоростей — 4.9, 4.5 и 3.9 м/с, когда глубины озера достигали соответственно 526, 273 и 192 м. Эта модель подтверждается наличием в теле гряд по георадарным данным от 3 до 5 поверхностей реактивации, которые изначально интерпретировались как следствие формирования грядового поля в течение не одного, а нескольких последовательных спусков озера (Carling et al., 2016).

Благодаря значительному количеству гряд, изученных в ходе данной работы, нам удалось выявить пространственные закономерности распределения параметров их внутренней структуры. Курайские гряды различаются по высоте, глубине залегания цоколя и числу слагающих их пачек отложений. В северной части поля расположены более высокие гряды с числом пачек более трех, в том числе с пачками с обратным направлением слоистости. В южной части гряды устроены более просто (обычно в них присутствует только одна пачка), они менее высокие, причем четко прослеживается тенденция постепенного уменьшения высоты гряд с севера на юг. Поскольку дно впадины поднимается в том же направлении, можно говорить о зависимости процесса формирования гряд от глубины потока (течения в спускавшемся озере): южная периферия грядового поля формировалась при меньших глубинах, чем северная. Однако такая разница не должна оказывать существенного влияния на однородность донных гряд при глубинах движущейся аодной толщи 400–500 м. При таких глубинах грядовое поле должно было бы быть однородным по внутреннему строению и высоте отдельных гряд. Поэтому, вероятнее всего, гряды начали формироваться при более низких уровнях озера. Мы предполагаем, что в южной части глубины воды и скорости течения быстро упали ниже критических, сформировав невысокие гряды, в то время как в северной части глубина и скорости течения еще оставались достаточными для продолжения грядообразования.

Общее время формирования Курайского грядового поля можно оценить по данным моделирования временем существования скоростей течения, достаточных для транспорта галечно-валунных наносов. В работе (Bohorquez et al., 2016) это время оценивалось всего в 1.3 ч. Последняя усовершенствованная модель показала, что скорость течения над этим грядовым полем значительно пульсировала и необходимые для транспорта наносов условия возникали в течение трех интервалов времени общей продолжительностью в 17 ч (Bohorquez et al., 2019). Наличие у северных

гряд покровных пачек с обратной слоистостью позволяет предположить, что перед падением скоростей ниже критических для транспорта наносов и окончательной стабилизацией гряд направление течения изменилось на обратное. Такая гидродинамика подтверждается результатами моделирования, согласно которым в последние 1–2 ч перед осушением озера течение испытывало резкие пульсации с изменениями направления течения на 180° (см. fig. 14 в Bohorquez et al., 2019).

Следующим этапом работы должны стать сравнение параметров внешней и внутренней структуры и поиск их взаимосвязей для понимания степени неоднородности грядового поля как такового. В этой работе для морфометрического анализа был взят однородный участок на юге поля. Как видно из диаграммы на рис. 6 (в), это участок с наиболее мелкими грядами, содержащими одну пачку отложений. Проанализировав морфометрический рисунок других участков поля, можно распространить на них информацию о внутреннем строении, полученную при помощи георадара на нескольких грядах из этих участков. Комплексный подход к анализу морфометрических и морфологических характеристик, предложенный в настоящем исследовании, может применяться к грядовому рельефу различного генезиса (барханы, друмлины, куполовидные дюны).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексный анализ показателей внешней и внутренней структуры грядового рельефа дна Курайской котловины позволяет окончательно отвергнуть гипотезы ледникового и остаточного эрозионного происхождения этого рельефа и подтвердить представления о формировании гряд в результате действия озерного течения значительной скорости и глубины. Установлено, что по статистическому распределению морфометрических параметров гряды Курайской котловины близки к грядовым полям, образованным водными потоками, и разительно отличаются от моренного и эрозионного рельефа. Их внутреннее строение, определенное по данным георадиолокации, также типично для русловых гряд на дне рек — в поперечном сечении гряд однозначно выделяются косослоистые пачки с падением слоев в направлении потока. Впервые проведенное на значительном протяжении георадарное профилирование позволило разделить гряды по внутреннему строению на три типа: содержащие одну, две или три и более косослоистых пачек отложений. Наиболее просто устроенными оказались гряды в южной части поля, где они состоят из одной пачки и имеют небольшие размеры. В северной части, расположенной гипсометрически на 80 м ниже южной, гряды наиболее крупные и состоят из нескольких пачек, что указывает на несколько

импульсов их движения. Такая связь с положением гряд в современном рельефе котловины указывает на связь формирования гряд с глубиной течения, значительно различавшейся в северной и южной частях грядового поля. Для того, чтобы перепад высот в 80 м существенно влиял на грядобразование, общая глубина течения над грядовым полем должна быть не более 200–300 м. Это условие могло выполняться только на заключительном этапе спуска озера.

В крупных грядах северной части грядового поля впервые обнаружены пачки с падением слоев, обратным предполагаемому направлению течения, что указывает на еще более сложную динамику потока, чем предполагалось ранее. Эти данные находятся в хорошем соответствии с последними результатами математического моделирования процесса спуска Курайского озера (Bohorquez et al., 2019), согласно которым в последние 1–2 ч перед его осушением на каждом участке поток приобретал значительную турбулентность с периодическими изменениями направления течения на противоположное.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках проекта РНФ № 19-17-00179. При камеральной обработке материалов использовалась инфраструктура Института географии РАН в рамках темы государственного задания АААА-А19-119021990091-4 (FMGE-2019-0005). Программное обеспечение Agisoft Metashape и аппаратное обеспечение для обработки массива аэрофотоснимков с БПЛА и создания детальной ЦМР предоставлены Центром Коллективного Пользования “Геопортал МГУ”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барышников Г.Я.* Развитие рельефа переходных зон горных стран в кайнозой (на примере Горного Алтая). Томск: Изд-во ТГУ, 1992. 182 с.
- Борисов Б.А., Минина Е.А.* Ледниковые отложения Алтае-Саянской ледниковой области // Хронология плейстоцена и климатическая стратиграфия: К IX Междунар. конгрессу ИНКВА, Новая Зеландия. Л.: Географическое общество СССР. Плейстоценовая комиссия, 1973. С. 140–148.
- Борисов Б.А., Минина Е.А.* О гипотезе катастрофических гляциальных паводков на территории Алтае-Саянской области в свете геолого-геоморфологических данных // Всерос. совещ. “Главнейшие итоги в изучении четвертич. периода и основные направления исследований в XXI веке”. СПб.: ВСЕГЕИ, 1998. С. 90–91.
- Бородавко П.С.* Эволюция Чуйско-Курайской лимно-системы в позднем неоплейстоцене. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Томск: ТГУ, 2003. 22 с.

- Бутвиловский В.В. Катастрофические сбросы вод ледниково-подпрудных озер Юго-Восточного Алтая и их следы в рельефе // Геоморфология. 1985. № 1. С. 65–74.
- Бутвиловский В.В. Палеогеография последнего оледенения и голоцена Алтая: событийно-катастрофическая модель. Томск: Изд-во ТГУ, 1993. 253 с.
- Викторов А.С. Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука, 2006. 252 с.
- Владов М.Л., Судакова М.С. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений. Учебное пособие. М.: ГЕОС, 2017. 240 с.
- Гросвальд М.Г. Евразийские гидросферные катастрофы и оледенение Арктики. М.: Научный мир, 1999. 120 с.
- Деяткин Е.В. Кайнозойские отложения и неотектоника Юго-Восточного Алтая. М.: Наука, 1965. 244 с.
- Деев Е.В., Зольников И.Д., Курбанов Р.Н., Панин А.В., Мюррей А., Корженков А.М., Турова И.В., Позднякова Н.И., Васильев А.В. Возраст Сукорского сейсмогенного оползня по данным ОСЛ-датирования: значение для палеосейсмологии и палеогеографии Горного Алтая // Геология и геофизика. 2022. Т. 63. № 6. С. 743–754.
<https://doi.org/10.2113/RGG20204300>
- Зольников И.Д., Деев Е.В., Курбанов Р.Н., Панин А.В., Васильев А.В., Позднякова Н.И., Турова И.В. О возрасте чибитского оледенения Горного Алтая // ДАН. Науки о Земле. 2021а. Т. 496. № 2. С. 76–181.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X21020227>
- Зольников И.Д., Новиков И.С., Деев Е.В., Шпанский А.В., Михаревич М.В. О фациальном составе и стратиграфическом положении четвертичной верхне-нижесейской толщи в Тувинской и Минусинской впадинах // Геология и геофизика. 2021б. Т. 62. № 10. С. 1127–1138.
<https://doi.org/10.2113/RGG20204183>
- Зыкин В.С., Зыкина В.С., Савельева П.Ю., Мистрюков А.А. К истории речных долин Горного Алтая и Предалтайской равнины в плейстоцене // Мат-лы Всерос. науч. конф. “Рельеф и экзогенные процессы гор”. Т. 2. Иркутск: Изд. Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2011. С. 82–85.
- Инишев Н.Г., Рудой А.Н., Земцов В.А., Вершинин Д.А. Первая компьютерная модель течений в межгорной котловине при сбросе ледниково-подпрудного озера (на примере Курайской котловины, Горный Алтай) // ДАН. 2015. Т. 461. № 2. С. 220–222.
<https://doi.org/10.7868/S0869565215080216>
- Лобачева Д.М., Бадюкова Е.Н., Макшаев Р.Р. Литофациальное строение и условия накопления отложений бэровских бугров Северного Прикаспия // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2021. № 6. С. 99–111.
- Лунгерсгаузен Г.Ф., Раковец О.А. Некоторые новые данные о стратиграфии третичных отложений Горного Алтая // Тр. Всесоюз. аэрогеологического треста (ВАГТ). 1958. Вып. 4. С. 79–91.
- Окишев П.А. Динамика оледенения Алтая в позднем плейстоцене и голоцене. Томск: Изд-во ТГУ, 1982. 209 с.
- Окишев П.А., Бородавко П.С. Реконструкции “флювиальных катастроф” в горах Южной Сибири и их параметры // Вестник Томского ун-та. 2001. № 274. С. 3–13.
- Панин А.В., Барышников Г.Я., Сучилин А.А. Морфология и внутреннее строение валунных гряд в Курайской котловине Горного Алтая // География и природопользование Сибири. 2016. № 22. С. 113–124.
- Поздняков А.В. Самонамораживание ледово-подпрудной плотины – алгоритм саморегуляции // География и природные ресурсы. 2019. № 2. С. 10–18.
- Поздняков А.В., Окишев П.А. Механизм формирования донных гряд и возможный генезис “гигантской ряби” Курайской котловины Алтая // Геоморфология. 2002. № 1. С. 82–90.
- Поздняков А.В., Пупышев Ю.С. Чуйско-Курайское ледово-подпрудное озеро в стадиях формирования и деградации // Вестник Сибирского государственного ун-та геосистем и технологий. 2019. Т. 24. № 2. С. 238–247.
- Поздняков А.В., Пупышев Ю.С., Пучкин А.В. Подмененная реальность и истинный генезис Курайских гряд (Горный Алтай, Россия) // Геосферные исследования. 2022. № 2. С. 145–161.
- Поздняков А.В., Пупышев Ю.С., Пучкин А.В., Хон А.В. Механизм формирования “ряби течения” вследствие ручейково-бифуркационного расчленения поверхности (Курайская котловина, Горный Алтай) // Мат-лы Всерос. конф. “VIII Шукинские чтения: рельеф и природопользование”. М.: Изд-во МГУ, 2020. С. 347–353.
- Поздняков А.В., Тимофеев Д.А. Происхождение грядового рельефа Курайской котловины Горного Алтая // Геоморфология. 2007. № 2. С. 78–89.
- Поздняков А.В., Хон А.В. О генезисе “гигантской ряби” в Курайской котловине горного Алтая // Вестник Томского ун-та. 2001. № 274. С. 24–33.
- Рудой А.Н. Гигантская рябь течения – доказательство катастрофических прорывов гляциальных озер Горного Алтая // Современные геоморфологические процессы на территории Алтайского края (тезисы докладов к конференции) / А.М. Малолетко и др. Бийск: Географическое общество СССР, 1984. С. 60–64.
- Рудой А.Н. Гигантская рябь течения (история исследований, диагностика, палеогеографическое значение). Томск: Изд-во ТГУ, 2005. 224 с.
- Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных. Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 2008. 192 с.
- Agatova A.R., Nepov R.K., Carling P.A., Bohorquez P., Khazin L.B., Zhdanova A.N., and Moska P. Last ice-

- dammed lake in the Kuray basin, Russian Altai: New results from multidisciplinary research // *Earth Science Reviews*. 2020. Vol. 205.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103183>
- Bjornstad B.N.* Ice Age floodscapes of the Pacific Northwest. Springer International Publishing. 2021. 180 p.
- Bohorquez P., Carling P.A., and Herget J.* Dynamic simulation of catastrophic late Pleistocene glacial-lake drainage, Altai Mountains, Central Asia // *International Geology Reviews*. 2016. Vol. 58. P. 1795–1817.
<https://doi.org/10.1080/00206814.2015.1046956>
- Bohorquez P., Jimenez-Rui P.J., and Carling, P.A.* Revisiting the dynamics of catastrophic late Pleistocene glacial-lake drainage, Altai Mountains, Central Asia // *Earth-Science Reviews*. 2019. Vol. 197. 102892.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102892>
- Botha G.A., Bristow C.S., Porat N., Duller G., Armitage S.J., Roberts H.M., Clarke B.M., Kota M.W., and Schoeman P.* Evidence for dune reactivation from GPR profiles on the Maputaland coastal plain, South Africa / *Ground penetrating radar in sediments*. London. Geological Society Special Publications. 2003. No. 211. P. 29–46.
<https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2001.211.01.03>
- Bristow C.S. and Jol H.M.* (Eds.). *Ground Penetrating Radar in Sediments*. London: Geological Society Special Publications. 2003. No. 211. 330 p.
- Carling P.A.* A preliminary palaeohydraulic model applied to late Quaternary gravel dunes: Altai Mountains, Siberia / *Global continental changes: the context of palaeohydrology*. Geological Society Special Publications. London. 1996. No. 115. P. 165–179.
- Carling P.A.* Morphology, sedimentology and palaeohydraulic significance of large gravel dunes, Altai Mountains, Siberia // *Sedimentology*. 2009. Vol. 43. P. 647–664.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1996.tb02184.x>
- Carling P.A., Bristow C.S., and Litvinov A.S.* Ground-penetrating radar stratigraphy and dynamics of megaflood gravel dunes // *Journal of the Geological Society*. 2016. Vol. 173. P. 550–559.
<https://doi.org/10.1144/jgs2015-119>
- Carling P.A., Kirkbride A.D., Parnachev S., Borodavko P.S., and Berger G.W.* Late Quaternary catastrophic flooding in the Altai Mountains of south-central Siberia: A synoptic overview and introduction to flood deposit sedimentology / *Flood and Megaflood Processes and deposits: Recent and Ancient Examples*. International Association of Sedimentologists, Special Publication. 2002. Vol. 32. P. 17–35.
- Gómez-Ortiz D., Martín-Crespo T., Rodríguez I., Sánchez M.J., and Montoya I.* The internal structure of modern barchan dunes of the Ebro River delta (Spain) from ground-penetrating radar // *Journal of Applied Geophysics*. 2009. Vol. 68. Iss. 2. P. 159–170.
<https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2008.11.007>
- Herget J.* Reconstruction of Pleistocene ice-dammed lake outburst floods in the Altai Mountains, Siberia // *Geological Society of America Special Papers*. 2005. Vol. 386. 118 p.
<https://doi.org/10.1130/0-8137-2386-8.1>
- Komatsu G., Arzhannikov S.G., Gillespie A.R., Burke R.M., Miyamoto H., and Baker V.R.* Quaternary paleolake formation and cataclysmic flooding along the upper Yenisei River // *Geomorphology*. 2009. Vol. 104. No. 3–4. P. 143–164.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.08.009>
- Li M.Z., Shaw J., Todd B.J., Kostylev V.E., and Wu Y.* Sediment transport and development of banner banks and sandwaves in an extreme tidal system: Upper Bay of Fundy, Canada // *Continental Shelf Research*. 2014. Vol. 83. P. 86–107.
<https://doi.org/10.1016/j.csr.2013.08.007>
- Möller P. and Dowling T.P.F.* Equifinality in glacial geomorphology: Instability theory examined via ribbed moraine and drumlins in Sweden // *GFF*. 2018. Vol. 140. No. 2. P. 106–135.
<https://doi.org/10.1080/11035897.2018.1441903>
- Qian G., Yang Z., Luo W., Dong Z., Lu J., and Tian M.* Morphological and sedimentary characteristics of dome dunes in the northeastern Qaidam Basin, China // *Geomorphology*. 2020. Vol. 350.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106923>
- Rudoy A.N. and Baker V.R.* Sedimentary effects of cataclysmic late Pleistocene glacial outburst flooding, Altai Mountains, Siberia // *Sedimentary Geology*. 1993. Vol. 85. No. 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)
- Schrott L. and Sass O.* Application of field geophysics in geomorphology: Advances and limitations exemplified by case studies // *Geomorphology*. 2008. Vol. 93. No. 1–2. P. 55–73.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.12.024>
- Silvestro S., Fenton L.K., Michaels T.I., Valdez A., and Ori G.G.* Interpretation of the complex dune morphology on Mars: Dune activity, modelling and a terrestrial analogue // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2012. Vol. 37. P. 1424–1436.
<https://doi.org/10.1002/esp.3286>
- Van Dam R.L.* Landform characterization using geophysics – recent advances, applications, and emerging tools // *Geomorphology*. 2012. Vol. 137. No. 1. P. 57–73.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.09.005>
- Zhang Y., Wu Ch., Gao Ya., and Yang B.* From flapping bumblebee to evolving sand dune: A reconstruction-based algorithm to feature the digitally recorded objects // *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*. 2018. Vol. 33. No. 4.
<https://doi.org/10.1142/S0218001419540156>

THE ORIGIN OF GIANT DUNES IN THE KURAY BASIN (SOUTHEASTERN GORNY ALTAI) BASED ON MORPHOMETRIC ANALYSIS AND GPR STUDIES

S. S. Bricheva^{a,b,c,#}, T. V. Gonikov^d, A. V. Panin^b, E. V. Deev^{c,e}, V. M. Matasov^{f,g}, M. M. Doroshenko^{b,d},
A. L. Entin^{b,d}, and D. M. Lobacheva^d

^aLomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Moscow, Russia

^bInstitute of Geography RAS, Moscow, Russia

^cNovosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

^dLomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

^eTrofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB of RAS, Novosibirsk, Russia

^fRUDN University, Moscow, Russia

^gNational Research University "Higher School of Economics" (HSE), Moscow, Russia

[#]E-mail: bricheva@igras.ru

New data on the mechanism of giant dunes formation in the Kuray Basin of the Gorny Altai has been obtained in the Kuray dune field on the right bank of the Tjute River. We analyzed its morphology from remote sensing data (satellite images and UAV) and the internal structure of dunes with ground-penetrating radar. The morphometric indices: dune lengths and distribution of special points of the Kuray dune field were statistically compared with indices for dune landscapes of different genesis: cata-fluvial dune field near Lake Missoula (USA), ribbed moraine in southern Scandinavia, Baer knolls of Northern Pre-Caspian, Yenisei flood ridges, riverbed ridges of Tapi River, India, and erosion patterns of Loess plateau in China. In terms of the statistical distribution of morphometric parameters, the Kuray dune field is close to the dune fields formed by water streams and strikingly different from moraine and erosional landscapes. Their internal structure, which was determined by ground-penetrating radar data, is also typical of channel dunes on river beds: one or more oblique-layered strata with a dip in the stream flow direction are unambiguously identified in the cross-sections. The results obtained allow us to finally confirm ridge formation to be a result of a powerful water flow apparently formed by the descent of a subglacial lake occupying the Kuray Basin. New details of the dune formation mechanism have been established. The relationship between dunes' size, internal structure and the altitudinal position at the bottom of the basin, points to the dependence of their formation on the depth of the flow. At shallower depths (southern part of the Kuray dune field), small dunes composed of a single laminated package (one pulse of motion) were formed; at greater depths (the northern part), large ridges composed of several laminated packages (several pulses of motion) were formed. The height difference between the southern and northern periphery of the dune field is about 80 m. For the difference less than 80 m to be significant for the dune formation, the average flow depth should not have exceeded 200–300 m, i.e. dune formation occurred closer to the end of the lake descent. Our study for the first time establishes the presence of packages with the reverse direction of layering within large dunes in the northern part of field. This fact indicates the possibility of reversible flow movement at the final stage of dune field formation. This indicates an increase in the instability of the current, the appearance of its rapid multidirectional pulsations at the last stage of lake drainage.

Keywords: Gorny Altai, Kuray Basin, giant current ripples, glacial lake outburst, morphometric analysis, ground-penetrating radar

ACKNOWLEDGEMENTS

This study contributes to the RSF project No. 19-17-00179. For data processing, the infrastructure of the Institute of Geography RAS was used within the framework of the state assignment No. AAAA-A19-119021990091-4 (FMGE-2019-0005). Agisoft Metashape software and specific hardware for aerial photography processing and fine-resolution DEM creation was provided by the Center of Collective Usage "Geoportal MSU".

REFERENCES

- Agatova A.R., Nepop R.K., Carling P.A., Bohorquez P., Khazin L.B., Zhdanova A.N., and Moska P. Last ice-dammed lake in the Kuray basin, Russian Altai: New results from multidisciplinary research. *Earth Science Reviews*. 2020. Vol. 203. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103183>
- Baryshnikov G.Ya. *Razvitie rel'efa perekhodnykh zon gornykh stran v kainozoe* (na primere Gornogo Altaya) (The development of the relief of the transition zones of mountainous countries in the Cenozoic (using the example of the Altai Mountains)). Tomsk: TSU (Publ.), 1992. 182 p. (in Russ.)
- Bjornstad B.N. Ice Age Floodscapes of the Pacific Northwest. *Springer International Publishing*. 2021. 180 p.
- Bohorquez P., Carling P.A., and Herget J. Dynamic simulation of catastrophic late Pleistocene glacial-lake drainage, Altai Mountains, central Asia. *International*

- Geology Reviews*. 2016. 58. P. 1795–1817.
<https://doi.org/10.1080/00206814.2015.1046956>
- Bohorquez P., Jimenez-Rui P.J., and Carling P.A. Revisiting the dynamics of catastrophic late Pleistocene glacial-lake drainage, Altai Mountains, Central Asia. *Earth-Science Reviews*. 2019. Vol. 197.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102892>
- Borisov B.A. and Minina E.A. Glacial deposits of the Altai-Sayan glacial region. *Chronology of Pleistocene and climatical stratigraphy: For the IX-th Congress of INQUA, New Zealand*. Leningrad: Geographic Society of USSR (Publ.), 1973. P. 140–148. (in Russ.)
- Borisov B.A. and Minina E.A. On the hypothesis of catastrophic glacial floods in the Altai-Sayan region in the context of geological and geomorphological data. *Vse-ros. soveshch. "Glavneishie itogi v izuchenii chetv. perioda i osnovnye napravleniya issledovaniy v XXI veke"*. SPb: VSEGEI (Publ.), 1998. P. 90–91. (in Russ.)
- Borodavko P.S. *Evolutsiya Chyuisko-Kuraiskoi limnosistemy v pozdnem neopleistotsene* (Evolution of the Chuya-Kurai limnosystem in the Late Pleistocene). PhD Thesis. Tomsk: TGU (Publ.), 2003. 22 p. (in Russ.)
- Botha G.A., Bristow C.S., Porat N., Duller G., Armitage S.J., Roberts H.M., Clarke B.M., Kota M.W., and Schoeman P. Evidence for dune reactivation from GPR profiles on the Maputaland coastal plain, South Africa. *Ground penetrating radar in sediments*. London. Geological Society Special Publications. 2003. No. 211. P. 29–46.
<https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2001.211.01.03>
- Bristow C.S. and Jol H.M. (Eds.). *Ground Penetrating Radar in Sediments*. London: Geological Society Special Publications. 2003. No. 211. 330 p.
- Butvilovskii V.V. Catastrophic releases of waters of glacial lakes of the south-eastern Altai and their traces in relief. *Geomorfologiya*. 1985. No. 1. P. 65–74. (in Russ.)
- Butvilovskii V.V. *Paleogeografiya poslednego oledneniya i golotsena Altaya: Sobytiino-katastroficheskaya model'* (Paleogeography of the Last Glaciation and the Holocene of Altai: a catastrophic events model). Tomsk: TGU (Publ.), 1993. 253 p. (in Russ.)
- Carling P.A. A preliminary palaeohydraulic model applied to late Quaternary gravel dunes: Altai Mountains, Siberia. Branson J., Brown A.G., and Gregory K.J. (Eds.) *Global continental changes: the context of palaeohydrology*. Geological Society Special Publications. London. 1996. No. 115. P. 165–179.
- Carling P.A. Morphology, sedimentology and palaeohydraulic significance of large gravel dunes, Altai Mountains, Siberia. *Sedimentology*. 2009. Vol. 43. P. 647–664.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1996.tb02184.x>
- Carling P.A., Bristow C.S., and Litvinov A.S. Ground-penetrating radar stratigraphy and dynamics of megaflood gravel dunes. *Journal of the Geological Society*. 2016. Vol. 173. P. 550–559.
<https://doi.org/10.1144/jgs2015-119>
- Carling P.A., Kirkbride A.D., Parnachev S., Borodavko P.S., and Berger G.W. Late Quaternary catastrophic flooding in the Altai Mountains of south-central Siberia: A synoptic overview and introduction to flood deposit sedimentology. *Flood and Megaflood Processes and deposits: Recent and Ancient Examples*. International Association of Sedimentologists, Special Publication. 2002. Vol. 32. P. 17–35.
- Deev E.V., Zolnikov I.D., Kurbanov R.N., Panin A.V., Murray A., Korzhenkov A.M., Turova I.V., Pozdnyakova N.I., and Vasiliev A.V. OSL Dating of the Sukor earthquake-induced rockslide in Gorny Altai: Paleoseismological and paleogeographic implications. *Russian Geology and Geophysics*. 2022. Vol. 63. No. 6. P. 743–754.
<https://doi.org/10.2113/RGG20204300>
- Devyatkin E.V. *Kainozoiskie otlozheniya i neotektonika Yugo-Vostochnogo Altaya* (Cenozoic sediments and neotectonics of the south-eastern Altai). Moscow: Nauka (Publ.), 1965. 244 p. (in Russ.)
- Gómez-Ortiz D., Martín-Crespo T., Rodríguez I., Sánchez M.J., and Montoya I. The internal structure of modern barchan dunes of the Ebro River delta (Spain) from ground-penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*. 2009. Vol. 68. No. 2. P. 159–70.
- Grosswald M.G. *Evrasiiskie gidrosfernye katastrofy i olednenie Arktiki* (Eurasian hydrospheric catastrophes and the Arctic glaciations). Moscow: Nauchnyi mir (Publ.), 1999. 120 p. (in Russ.)
- Herget J. Reconstruction of Pleistocene ice-dammed lake outburst floods in the Altai Mountains, Siberia. *Geological Society of America Special Papers*. 2005. Vol. 386. 118 p.
<https://doi.org/10.1130/0-8137-2386-8.1>
- Inishev N.G., Rudoy A.N., Zemtsov V.A., and Vershinin D.A. The first computer model of currents in the Kurai intermountane basin, Altai, under release of a glacial-dammed lake. *Doklady Earth Sciences*. 2015. Vol. 461. No. 1. P. 283–285.
<https://doi.org/10.7868/S0869565215080216>
- Komatsu G., Arzhannikov S.G., Gillespie A.R., Burke R.M., Miyamoto H., and Baker V.R. Quaternary paleolake formation and cataclysmic flooding along the upper Yenisei River. *Geomorphology*. 2009. Vol. 104. No. 3–4. P. 143–164.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.08.009>
- Li M.Z., Shaw J., Todd B.J., Kostylev V.E., and Wu Y. Sediment transport and development of banner banks and sandwaves in an extreme tidal system: Upper Bay of Fundy, Canada. *Continental Shelf Research*. 2014. Vol. 83. P. 86–107.
<https://doi.org/10.1016/j.csr.2013.08.007>
- Lobacheva D.M., Badyukova E.N., and Makshaev R.R. Lithofacial structure and conditions of accumulation of Baer knoll deposits in the Northern Caspian region. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. 2021. No. 6. P. 99–111. (in Russ.)
- Lungersgauzen G.F. and Rakovec O.A. Some new data on the stratigraphy of Tertiary deposits in the Altai Mountains. *Tr. VAGT*. 1958. Vol. 4. P. 79–91. (in Russ.)
- Möller P. and Dowling T.P.F. Equifinality in Glacial Geomorphology: Instability Theory Examined via Ribbed Moraine and Drumlins in Sweden. *GFF*. 2018. Vol. 140. No. 2. P. 106–135.
<https://doi.org/10.1080/11035897.2018.1441903>
- Okishev P.A. *Dinamika oledneniya Altaya v pozdnem pleistotsene i golotsene* (Dynamics of glaciation in the Altai in

- the Late Pleistocene and Holocene). Tomsk: TGU (Publ.), 1982. 209 p. (in Russ.)
- Okishev P.A. and Borodavko P.S. Reconstructions of “fluvial catastrophes” in the mountains of Southern Siberia and their parameters. *Vestnik Tomskogo universiteta*. 2001. No. 274. P. 3–13. (in Russ.)
- Panin A.V., Baryshnikov G.Ya., and Suchilin A.A. Morphology and internal structure of boulder ridges in the Kurai basin of the Altai Mountains. *Geografiya i prirodopol'zovanie Sibiri*. 2016. No. 22. P. 113–124. (in Russ.)
- Pozdnyakov A.V. Self-freezing of the ice dam: the self-regulation algorithm. *Geography and Natural Resources*. 2019. Vol. 40. No. 2. P. 180–186.
- Pozdnyakov A.V. and Khon A.V. On the genesis of the “giant ripple” in the Kuray basin of the Altai Mountains. *Vestnik Tomskogo universiteta*, 2001. No. 274. P. 24–33. (in Russ.)
- Pozdnyakov A.V. and Okishev P.A. Bottom dunes generation mechanism and possible genesis of “gigantic ridges” of Kurai basin in Altai Mountains. *Geomorfologiya*. 2002. No. 1. P. 82–90. (in Russ.)
- Pozdnyakov A.V. and Pupyshev Yu.S. Chuya-Kurai ice-dammed lake in the stages of filling and drainage. *Vestnik SGUGiT*. 2019. Vol. 24. No. 2. P. 238–247. (in Russ.)
- Pozdnyakov A.V., Pupyshev Yu.S., Puchkin A.V., and Khon A.V. Mechanism of “current ripple” formation due to stream-bifurcation dissection of the surface (Kurai basin, Altai Mountains). *Materialy Vseros. konf. “VIII Shchukinskie chteniya: rel'ef i prirodopol'zovanie*. M.: MSU (Publ.), 2020. P. 347–353. (in Russ.)
- Pozdnyakov A.V., Pupyshev Yu.S., and Puchkin A.V. Substituted reality and the true genesis of the Kuray Ridges (Altai Mountains, Russia). *Geosfernye issledovaniya*. 2022. No. 2. P. 145–161. (in Russ.)
- Pozdnyakov A.V. and Timofeyev D.A. Genesis of ridge relief in the Kuraiskaya depression (Mountain Altai). *Geomorfologiya*. 2007. No. 2. P. 78–89. (in Russ.)
- Qian G., Yang Z., Luo W., Dong Z., Lu J., and Tian M. Morphological and sedimentary characteristics of dome dunes in the northeastern Qaidam Basin, China. *Geomorphology*. 2020. Vol. 350. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106923>
- Rudoy A.N. and Baker V.R. Sedimentary effects of cataclysmic late Pleistocene glacial outburst flooding, Altai Mountains, Siberia. *Sedimentary Geology*. 1993. Vol. 85. No. 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. *Gigantskaya ryab' techeniya (istoriya issledovaniy, diagnostika, paleogeograficheskoe znachenie)* (Giant current ripples (history of research, diagnosis, paleogeographical significance). Tomsk: TGU (Publ.), 2005. 224 p. (in Russ.)
- Rudoy A.N. Giant current ripples as proof of catastrophic glacial lake outbursts in the Altai Mountains. *Sovremnyye geomorfologicheskie protsessy na territorii Altayskogo kraya (tezisy dokladov k konferentsii)*. Bijsk: Geographical Society of the USSR (Publ.), 1984. P. 60–64. (in Russ.)
- Schrott L. and Sass O. Application of Field Geophysics in Geomorphology: Advances and Limitations Exemplified by Case Studies. *Geomorphology*. 2008. Vol. 93. No. 1–2. P. 55–73. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.12.024>
- Silvestro S., Fenton L.K., Michaels T.I., Valdez A., and Ori G.G. Interpretation of the complex dune morphology on Mars: Dune activity, modelling and a terrestrial analogue. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2012. Vol. 37. P. 1424–1436. <https://doi.org/10.1002/esp.3286>
- Starovoitov A.V. *Interpretatsiya georadiolokatsionnykh dannykh. Uchebnoe posobie* (The ground-penetrating radar data interpretation. Training guide). Moscow: MSU (Publ.), 2008. 192 p. (in Russ.)
- Van Dam R.L. Landform characterization using geophysics – recent advances, applications, and emerging tools. *Geomorphology*. 2012. Vol. 137. No. 1. P. 57–73. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.09.005>
- Viktorov A.S. *Osnovnye problemy matematicheskoi morfologii landshafta* (Basic problems in mathematical landscape morphology). Moscow: Nauka (Publ.), 2006. 252 p. (in Russ.)
- Vladov M.L. and Sudakova M.S. *Georadiolokatsiya. Ot fizicheskikh osnov do perspektivnykh napravlenii. Uchebnoe posobie* (Ground-penetrating radar. From the physical basics to the perspective areas. Training guide). Moscow: GEOS (Publ.), 2017. 240 p. (in Russ.)
- Zhang Y., Wu Ch., Gao Ya., and Yang B. From flapping bumblebee to evolving sand dune: A reconstruction-based algorithm to feature the digitally recorded objects. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*. 2018. Vol. 33. No. 4. <https://doi.org/10.1142/S0218001419540156>
- Zolnikov I.D., Deev E.V., Kurbanov R.N., Panin A.V., Vasiliev A.V., Pozdnyakova N.I., and Turova I.V. Age of the Chibit Glaciation in Gornyi Altai. *Doklady Earth Sciences*. 2021a. Vol. 496. No. 2. P. 76–181. <https://doi.org/10.1134/S1028334X21020227>
- Zolnikov I.D., Novikov I.S., Deev E.V., Shpansky A.V., and Mikharevich M.V. Facies composition and stratigraphic position of the Quaternary Upper Yenisei sequence in the Tuva and Minusa depressions. *Russian Geology and Geophysics*. 2021b. Vol. 62. No. 10. P. 1127–1138. <https://doi.org/10.2113/RGG20204183>
- Zykin V.S., Zykina V.S., Savel'eva P.Yu., and Mistryukov A.A. On the history of river valleys in the Altai Mountains and the Near-Altai plain in the Pleistocene. *Mat-ly Vseros. nauch. konf. “Rel'ef i ekzogennye protsessy gor”*. Irkutsk: IG SB RAS (Publ.), 2011. Vol. 2. P. 82–85. (in Russ.)