

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОСФЕРЫ

УДК 551.4

DOI: 10.15372/KZ20230206

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПЛОЩАДЕЙ
ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР В ПРЕДЕЛАХ РАЗЛИЧНЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ ТИПОВ
ПОВЕРХНОСТЕЙ ЭРОЗИОННО-ТЕРМОКАРСТОВЫХ РАВНИН****А.С. Викторов*, В.Н. Капралова, Т.В. Орлов***Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
101000, Москва, Уланский пер., 13, стр. 2, Россия***Автор для контакта, dist@geoenv.ru*

Проведен сравнительный анализ статистических распределений площадей термокарстовых озер в пределах различных генетических типов поверхностей эрозионно-термокарстовых равнин – участков, расположенных на волнистых междуречьях, и участков пониженных поверхностей, занятых хасыреями (аласами), нередко образующими слившиеся массивы. С использованием количественных критериев и космических снимков на материале восьми участков, находящихся в разных физико-географических условиях (Ямал, Тазовский полуостров, Колымская низменность, долина Пенжины), установлено существование статистически значимых различий распределений площадей термокарстовых озер в пределах разных генетических типов поверхностей. На основе статистического анализа показано, что распределение площадей термокарстовых озер является интегрально-экспоненциальным. Это позволяет сделать вывод, что на каждом из двух типов поверхности в пределах эрозионно-термокарстовых равнин устанавливается динамическое равновесие в процессах возникновения, роста и спуска термокарстовых озер. При существенных различиях наблюдается коррелированность значений параметров распределений площадей термокарстовых озер на основной водораздельной поверхности эрозионно-термокарстовых равнин и площадей вторичных озер в хасыреях.

Ключевые слова: эрозионно-термокарстовые равнины, математическая морфология ландшафта, хасыреи, аласы, термокарстовые озера.

Ссылка для цитирования: Викторов А.С., Капралова В.Н., Орлов Т.В. Сравнительный анализ распределений площадей термокарстовых озер в пределах различных генетических типов поверхностей эрозионно-термокарстовых равнин // Криосфера Земли, 2023, т. XXVII, № 2, с. 55–64. DOI: 10.15372/KZ20230206.

**COMPARATIVE ANALYSIS OF AREA DISTRIBUTIONS
FOR THERMOKARST LAKES WITHIN DIFFERENT TYPES OF THE SURFACE
OF THERMOKARST PLAINS WITH FLUVIAL EROSION****A.S. Victorov*, V.N. Kapralova, T.V. Orlov***Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,
Ulansky per. 13, str. 2, Moscow, 101000, Russia***Corresponding author, dist@geoenv.ru*

Thermokarst plains with fluvial erosion include two genetically different types of surface: slightly undulating watersheds and lowered surfaces of khasyreys (drained thermokarst lakes with secondary thermokarst lakes). The research deals with a comparative analysis of statistical distributions of the areas of thermokarst lakes and secondary lakes. Using statistical criteria and remote sensing data for eight key sites in different natural conditions, such as Yamal and Taz peninsulas, the Kolyma Lowland, and the Penzhina River valley, we determined statistically significant differences in the area distributions of thermokarst lakes within different genetic types of the surface. Statistical analysis shows that the areas of thermokarst lakes correspond to an integral-exponential distribution. This allows us to conclude that a dynamic equilibrium is established within each type of the surface in the course of the initiation, growth, and drainage of thermokarst lakes. Though the parameters of thermokarst lakes differ significantly, we find a correlation between the distribution parameters of lake areas within the main surface of thermokarst plains with fluvial erosion and the surface of khasyreys with secondary lakes.

Keywords: thermokarst plains with fluvial erosion, mathematical morphology of landscape, khasyrey, alas, thermokarst lakes.

ВВЕДЕНИЕ

Значительное количество работ посвящено исследованию развития равнин криолитозоны с преобладанием озерного термокарста. В рамках проекта Permafrost Region Pond and Lake Database (PeRL) ведется сбор информации о границах термокарстовых озер, полученной по высокодетальным космическим снимкам. Развивается также направление изучения криолитозоны и термокарстовых озер в ней, основанное на анализе разновременных космофотоснимков [Olefelt et al., 2016].

В настоящее время ведутся широкие и многочисленные исследования, посвященные морфометрическому изучению и инвентаризации озер в целом. Так, в работе [Verpoorter et al., 2014] проанализировано около 1.7 млн озер площадью более 0.002 км² по всему миру и охарактеризована зависимость их количества, площади и периметра от широты и высоты над уровнем моря. В других работах [Cael, Seekell, 2016] изучались распределение размеров и фрактальность границ (на основании отношения периметра к площади) для большого количества озер по всему миру и сравнивались с распределением озер в Швеции. В работе [Polishchuk et al., 2018] проанализировано около 70 участков в пределах Западной Сибири на предмет распределения размеров озер. Подобные исследования выполнялись и другими авторами [Муратов и др., 2021], в частности, проанализирована извилистость границы и сделан вывод, что при увеличении площади озер извилистость границы понижается. Следует отметить, что многие авторы [Verpoorter et al., 2014; Cael, Seekell, 2016; Polishchuk et al., 2018] используют либо картографические методы инвентаризации, либо автоматизированный анализ космических снимков и не разделяют озера по генезису и типу. Соответственно, в работах смешиваются озера разного типа, что является важным при полной инвентаризации площадей и количества озер, но ограничивает возможность анализа процессов, которые характерны для изучаемых объектов в силу их полигенетичности.

Аналогичные исследования проводятся китайскими учеными для Тибетского плато [Wei et al., 2021]. В них анализируются термокарстовые озера в горных условиях. Следует подчеркнуть, что авторы не делают выводов о законе распределения площадей озер, возможно потому, что анализируется большое количество озер в разных условиях.

Проводятся также локальные и региональные исследования состояния и динамики термокарстовых озер. Так, были изучены озера для Колымской низменности и получены данные об их увеличении на 4.5 % за период 1999–2018 гг. [Veremeeva et al., 2021]. Для равнин Юкона выявлено уменьшение площади озер в 1970-е–1990-е гг. при увеличе-

нии количества озер [Lantz, Turner, 2015]. Однако одновременно в [Jones et al., 2011] было показано, что число термокарстовых озер на изучаемой территории увеличилось за 60 лет на 10 %, при этом общая площадь озер снизилась и число крупных озер тоже уменьшилось. Об уменьшении количества озер в сибирской части Арктики сообщается в работе [Smith et al., 2005]. В [Belshe et al., 2013] показано, что для 12 % ландшафтов окрестностей оз. Эйт-Майл-Лейк (Канада) характерно возникновение новых первичных термокарстовых форм. В то же время при анализе дистанционных данных для равнин Юкона выявлено наличие разнонаправленных тенденций в изменении размеров озер: увеличение на 14 % к 1994 г. и уменьшение на 10 % в период 1999–2002 гг. по сравнению с размерами 1984 г. [Chen et al., 2014].

Изменение морфологической структуры ландшафтов криолитозоны рассматривалось в сравнительно небольшом числе работ [Кравцова, Быстрова, 2009; Полищук В., Полищук Ю., 2013; Morgenstern et al., 2011; Grosse et al., 2016; Polishchuk et al., 2018]. При этом практически не разделялись озерно-термокарстовые и эрозионно-термокарстовые равнины. В настоящей статье под эрозионно-термокарстовыми равнинами понимаются обширные поверхности с термокарстовыми понижениями, имеющие хорошо развитую эрозионную сеть, что отличает их от озерно-термокарстовых равнин, где развитие эрозионной сети существенно меньше. Полностью или частично дренированные термокарстовые котловины в Западной Сибири известны как хасыреи, а в Якутии – как аласы.

Наконец, в ряде исследований была сделана попытка создания математической модели морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин [Викторов, 2006; Викторов и др., 2016; Victorov, 2005]. Однако предложенная модель морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин имела определенные недостатки, на которые указывалось при обсуждении на конференциях, в частности В.Е. Тумским. Эти недостатки были связаны прежде всего с предположением об одинаковом ходе процессов возникновения, роста и спуска термокарстовых озер, возникших на основной водораздельной поверхности, и озер, возникших на поверхности термокарстовых понижений.

Таким образом, в исследованиях термокарстовых озер для выявления закономерностей их развития, в том числе количественных, как правило, недостаточно учитывались особенности развития озер, в частности, объединялись озера озерно-термокарстовых и эрозионно-термокарстовых равнин, а также озера, возникшие на повышенных участках ландшафта эрозионно-термокарстовых равнин, и озера, возникшие на поверхности термо-

карстовых понижений. Между тем развитие этих озер происходило, видимо, в различных условиях и подчинялось разным закономерностям. Без знания этих закономерностей трудно продолжать исследование процессов развития ландшафтов криолитозоны и проводить ретроспективный анализ.

Целью настоящей статьи является изложение результатов сравнительного анализа статистических распределений площадей термокарстовых озер в пределах различных генетических типов поверхностей эрозионно-термокарстовых равнин. При этом сделана попытка найти общие закономерности, характерные для соответствующего типа поверхностей на участках, находящихся в различных физико-географических, геологических и геокриологических условиях.

МЕТОДИКА СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПЛОЩАДЕЙ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР

Эрозионно-термокарстовые равнины представляют собой волнистые или слабохолмистые поверхности с тундровой или лесотундровой растительностью с вкраплением термокарстовых озер и термокарстовых понижений и развитием эрозионных форм. Озера и термокарстовые понижения имеют, как правило, округлые очертания и в беспорядке расположены в пределах равнины (рис. 1, а). Именно эта относительно возвышенная поверхность с развитыми на ней озерами, условно названная основной, является фоновой и представляет собой первый элемент анализа в настоящем исследовании (см. рис. 1, б).

Термокарстовые понижения нередко сливаются друг с другом, образуя кластеры, в их пределах также развиты озера, значительная часть которых являются вторичными, возникшими за счет

развития термокарстового процесса после появления термокарстового понижения. Эти озера авторами выделялись по четким резким очертаниям, часто округлой форме, несовпадению центра озера и центра термокарстового понижения. Остаточные озера в термокарстовых понижениях, наоборот, характеризуются расплывчатыми неправильными очертаниями, нерезкими границами. Указанная выше поверхность термокарстовых понижений, нередко сомкнувшихся (см. рис. 1, б), и вторичные озера на ней представляют собой второй объект анализа (остаточные озера не рассматривались).

На рис. 2 показаны изображения на материалах космической съемки озер на основной поверхности и вторичных озер на поверхности термокарстовых понижений.

Районы исследования расположены в различных физико-географических и геокриологических условиях (рис. 3) [*Геокриологическая карта...*, 1991; *Государственная геологическая карта РФ...*, 2000, 2015, 2016].

Первая группа участков расположена на территории п-ова Ямал и Тазовского полуострова с характерными высотными отметками 20–70 м. Участки преимущественно сложены аллювиально-морскими и морскими отложениями верхнеплейстоцен-голоценового и верхнеплейстоценового возраста. Отложения, слагающие верхнюю часть разреза, представлены обычно мелко- и среднезернистыми песками с примесью гравия и гальки, с прослоями суглинков, супесей и глин, реже отложения представлены супесчано-суглинистыми пачками. Для участков характерно сплошное распространение многолетнемерзлых пород со средней годовой температурой –3...–9 °С.

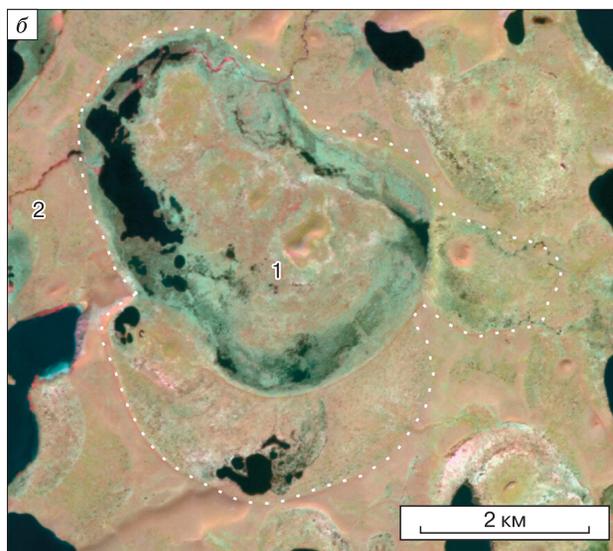
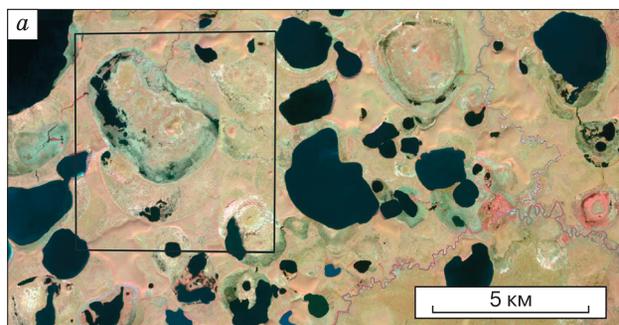


Рис. 1. Типичные изображения эрозионно-термокарстовых равнин на материалах космических съемок (Колымская низменность, снимок WorldView2, 0,5 м/пиксел, 01.07.2013 г.).

а – общее изображение; б – укрупненный фрагмент; 1 – кластер термокарстовых понижений; 2 – основная поверхность; белый пунктир – граница кластера термокарстовых понижений; черная линия – граница укрупненного фрагмента.



Рис. 2. Пример изображения на материалах космической съемки (п-ов Ямал, снимок SPOT 7, 1.5 м/пиксел, 18.07.2017 г.).

1 – озера на основной поверхности; 2 – вторичные озера на поверхности термокарстовых понижений; 3 (белый пунктир) – граница термокарстового понижения.

Вторая группа участков относится к Колымской низменности и имеет характерные высотные отметки 20–70 м. Они сложены лессовидными озерно-аллювиальными отложениями верхнего неоплейстоцена, которые на участках термокарстовых понижений перекрываются озерно-болот-

ными отложениями нижнего голоцена. Озерно-аллювиальные отложения представляют собой преимущественно глинистые алевриты с прослоями и линзами торфа. Для участков характерно сплошное распространение многолетнемерзлых пород со средней годовой температурой $-7...-11\text{ }^{\circ}\text{C}$. Верхи разреза представлены преимущественно сильнольдистыми песчанистыми алевритами с массивными криотекстурами и крупными ледяными жилами.

Третья группа включает один участок, расположенный в районе Пенжинской губы (Парапольский дол), и имеет характерные высотные отметки 70–230 м. Участок сложен преимущественно гляциофлювиальными отложениями нижнего неоплейстоцена. Отложения представлены галечниками с включением гравия, песка и валунов. Наблюдается сплошное развитие многолетнемерзлых пород со средней годовой температурой $-1...-3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Методика исследования включала следующие основные этапы:

- выбор ключевых участков в пределах эрозионно-термокарстовых равнин и получение космических снимков;
- развитие математической модели морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин с учетом существования двух типов условий развития термокарстовых озер – на основной поверхности ландшафта эрозионно-термокарстовых равнин и на поверхности термокарстовых понижений;
- оконтуривание озер и вычисление их площади;

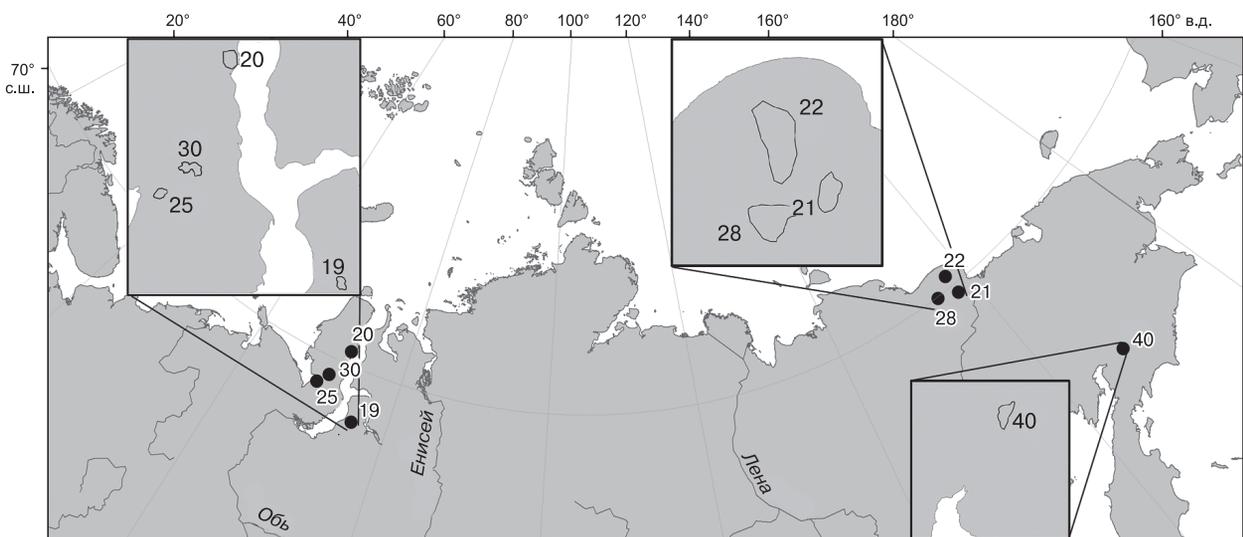


Рис. 3. Схема расположения ключевых участков.

Цифры – номера участков; черные кружки – местоположение участков; серые линии – границы участков на укрупненных врезках.

– формирование выборок термокарстовых озер, возникших на основной поверхности ландшафта эрозионно-термокарстовых равнин, и озер, возникших в пределах термокарстовых понижений¹;

– сравнение эмпирических распределений выборок по каждому участку с использованием критерия Смирнова;

– сопоставление эмпирических распределений и теоретических распределений, полученных на основе модели, получение данных о параметрах распределений;

– сравнение значений параметров распределений площадей термокарстовых озер, возникших на основной поверхности ландшафта эрозионно-термокарстовых равнин, и площадей озер, возникших на поверхности термокарстовых понижений, анализ взаимосвязей между значениями параметров;

– комплексное сопоставление и анализ полученных данных.

В основу выбора ключевых участков был положен принцип однородности физико-географических и геокриологических условий, а также морфологической однородности. Были использованы в основном космические снимки, выполненные в июне–сентябре 2013–2019 гг. с разрешением 0.5–1.5 м (WorldView-2, SPOT 6,7), за исключением участка 22 (Sentinel-2, с разрешением 10 м).

Формирование выборок площадей термокарстовых озер первого и второго типа для каждого участка производилось путем дешифрирования материалов космической съемки и оконтуривания озер с последующим определением их площадей с помощью программных модулей геоинформационной системы QGIS. Дешифрирование осуществлялось оператором ручным способом путем векторизации контуров водного зеркала озер. По описанным выше признакам озера делились на две группы: озера, возникшие на основной поверхности ландшафта эрозионно-термокарстовых равнин, и озера, возникшие в термокарстовых понижениях (последние нередко сливаются в кластеры).

Следующим этапом исследований было сравнение эмпирических распределений выборок по каждому участку для оценки значимости различий. Сравнение производилось с использованием критерия Смирнова, для которого не требуется знание вида распределения.

На следующем этапе выполнялось сопоставление эмпирических и теоретических интегрально-экспоненциальных распределений на основе критерия согласия Пирсона. При подсчетах вы-

полнялось обычное для данной методики условие, состоящее в том, что число значений в каждом классе, на который разбивается выборка при определении значения критерия, не должно быть менее 5, а в самой выборке не должно быть менее 50 значений. Объемы выборок находились в интервале 87–350. Далее сопоставлялись значения параметра распределений для площадей озер типа 1 и озер типа 2. В частности, определялись коэффициенты корреляции значений параметра для всей совокупности участков.

На последнем этапе проводился анализ всего комплекса данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В основу математической модели, разработанной для анализа рассматриваемой ситуации, положена математическая модель морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин в базовом варианте [Викторов, 2006; Victorov, 2005], однако ее предположения были изменены и адаптированы к следующим условиям.

1. Возникновения первичных термокарстовых понижений (очагов) на основной поверхности и на поверхности термокарстовых понижений за непересекающиеся отрезки времени (Δt) и на непересекающихся площадках (Δs) являются независимыми случайными событиями; вероятность возникновения понижений p_k (k – число понижений) зависит только от величины временного отрезка и размера площадки²:

$$p_1 = \lambda_1 \Delta s \Delta t + o(\Delta s \Delta t), \quad i = 1, 2,$$

$$p_k = o(\Delta s \Delta t), \quad k = 2, 3, \dots,$$

где λ_1, λ_2 – значения параметра для основной поверхности и поверхности термокарстовых понижений соответственно.

2. Возникновение первичных озер не происходит на площади существующих термокарстовых озер.

3. Радиус возникшего термокарстового озера как функция времени представляет собой случайный процесс; изменение радиуса происходит независимо от других озер, и его скорость пропорциональна плотности тепловых потерь через боковую поверхность озерной котловины.

4. В процессе роста озеро может перейти в термокарстовое понижение при его спуске эрозионной сетью, вероятность этого не зависит от других озер; при этом рост озера прекращается.

5. Возникновения истоков эрозионных форм на непересекающихся площадках являются независимыми случайными событиями со средней плотностью расположения истоков γ_1 и γ_2 для ос-

¹ Для краткости в статье первые называются озерами типа 1 и вторые – озерами типа 2.

² Для малых площадок и временных отрезков вероятность возникновения одного понижения много больше вероятности возникновения нескольких понижений.

новной поверхности и поверхности термокарстовых понижений соответственно; вероятность наличия истока на пробной площадке зависит только от ее размера³.

В базовом варианте модели плотность генерации озер и плотность расположения истоков эрозионных форм предполагались близкими и для основной поверхности, и для поверхности термокарстовых понижений, т. е. вся поверхность предполагалась относительно однородной по указанным параметрам [Викторов и др., 2016; Victorov, 2005]. Было показано, что в широком спектре физико-географических и геокриологических условий при значительном времени развития территория оказывается в состоянии динамического равновесия [Викторов, 2006; Victorov, 2005]. При этом процесс появления и роста термокарстовых озер компенсируется их спуском с превращением в термокарстовые понижения. Анализ базового варианта модели показал, что для состояния динамического равновесия характерен специальный вид распределения площадей термокарстовых озер, который был условно назван интегрально-экспоненциальным [Викторов и др., 2016, 2021].

В рассматриваемой ситуации при анализе допущений сформированной модели нетрудно видеть, что для каждой отдельной поверхности (основной поверхности и поверхности термокарстовых понижений и их кластеров) выполняются, по сути, условия базовой модели, т. е. каждый из типов поверхностей является относительно однородным по плотности генерации озер и плотности расположения истоков эрозионных форм. В этом случае, используя базовую модель, можно сделать вывод, что по прошествии значительного времени на каждом типе поверхности вероятно возникновение состояния динамического равновесия, соответственно, распределение площадей озер будет близко к интегрально-экспоненциальному распре-

делению со своими для каждого типа поверхности значениями параметров:

$$f_1(x, \infty) = -\frac{1}{x \text{Ei}(-\gamma_1 \varepsilon_1)} \exp(-\gamma_1 x), \quad x \geq \varepsilon_1,$$

$$f_2(x, \infty) = -\frac{1}{x \text{Ei}(-\gamma_2 \varepsilon_2)} \exp(-\gamma_2 x), \quad x \geq \varepsilon_2,$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – начальный размер озера для основной поверхности и поверхности термокарстовых понижений соответственно; γ_1, γ_2 – средние плотности расположения истоков эрозионных форм для свободной поверхности и поверхности термокарстовых понижений соответственно; $\text{Ei}(-x)$ – интегрально-экспоненциальная функция, при этом значения соответствующих параметров распределений площадей озер в общем случае отличны друг от друга.

Таким образом, из анализа предложенной выше несколько усложненной модели можно сделать вывод, что распределения площадей термокарстовых озер основной водораздельной поверхности (f_1) и поверхности термокарстовых понижений (f_2) могут соответствовать специальному виду распределения, которое условно названо интегрально-экспоненциальным, и это может быть одним из элементов эмпирической проверки.

Сравнение эмпирических распределений выборок по каждому участку с использованием критерия Смирнова позволило оценить статистическую значимость различия распределения площадей термокарстовых озер первого типа и второго типа независимо от гипотезы о принадлежности к тому или иному виду распределения. Результаты приведены в табл. 1 и на рис. 4. Анализ показывает, что на семи участках из восьми наблюдаются статистически значимые различия на уровне 0.99.

Следующим этапом было сопоставление эмпирических и теоретических распределений. Как

Таблица 1. Сравнение эмпирических распределений площадей озер по критерию Смирнова

Район	Индекс участка	Площадь, км ²	Объем выборки (число озер)		Максимальная разница		Параметр p^*	
			на основной поверхности	на поверхности термокарстовых понижений	отрицательная	положительная		
Полуостров Ямал	20	450	86	254	-0.012	0.227	$p < 0.005$	
	25	202	131	116	-0.092	0.098	$p > 0.10$	
	30	4419	260	132	0.00	0.261	$p < 0.001$	
Тазовский п-ов	19	207	87	105	0.00	0.359	$p < 0.001$	
	Колымская низменность	21	1157	252	172	0.00	0.276	$p < 0.001$
		22	2867	113	183	0.00	0.348	$p < 0.001$
Парапольский дол	28	1343	125	117	-0.012	0.245	$p < 0.005$	
	40	670	350	175	0.00	0.231	$p < 0.001$	

* Разница распределений статистически значима на уровне 0.99 в случае $p < 0.01$.

³ Для малых площадок эта вероятность много больше, чем вероятность наличия более чем одного истока.

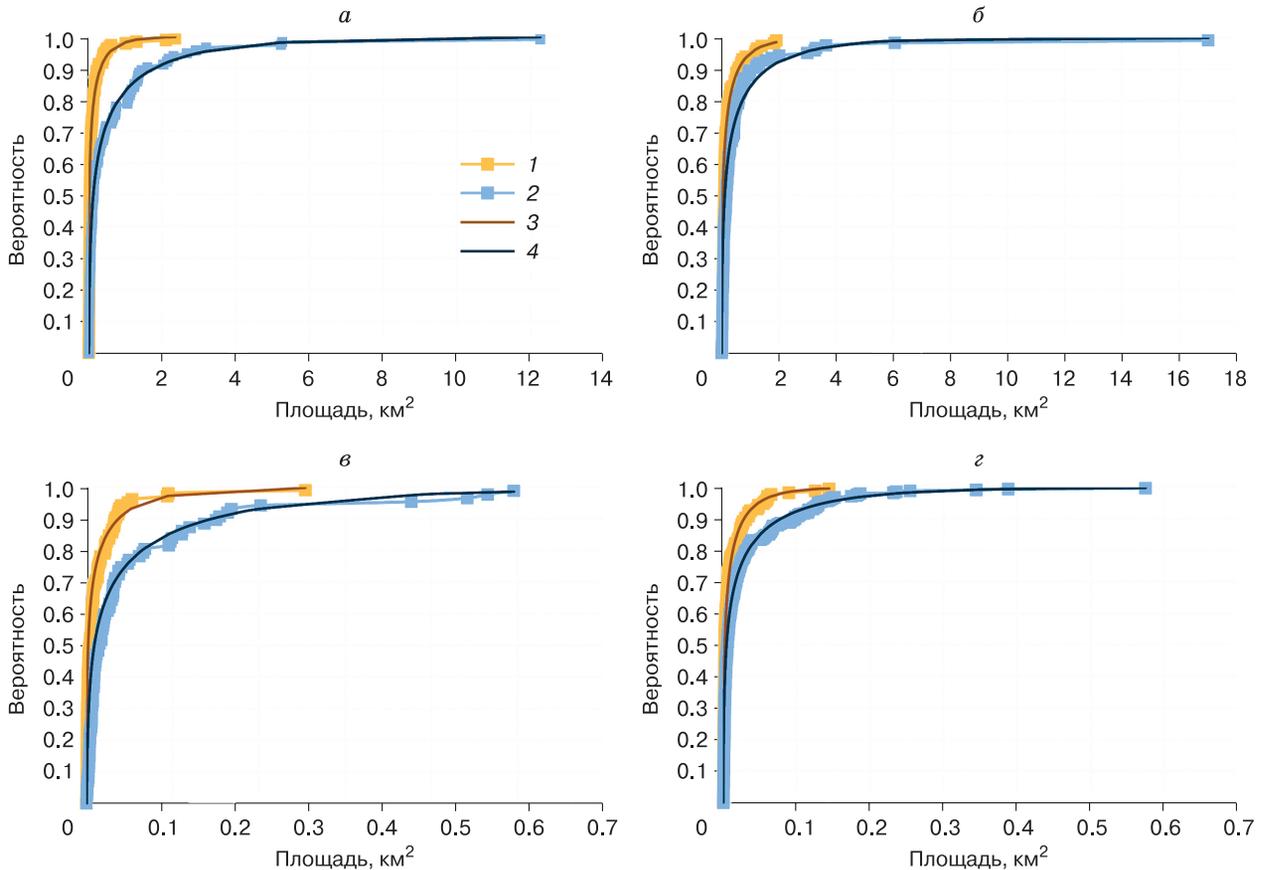


Рис. 4. Графики распределения площадей термокарстовых озер на участках 22 (а), 28 (б), 19 (в), 40 (г).

1, 2 – эмпирические распределения площадей озер второго и первого типа соответственно; 3, 4 – теоретические (интегрально-экспоненциальные) распределения площадей озер второго и первого типа соответственно.

следует из анализа модели развития морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин, должны наблюдаться интегрально-экспоненциальные распределения площадей озера. На первом шаге производилась оценка параметров этих распределений для каждой выборки. При этом за оценку параметра ϵ принималось минимальное значение выборки, а значение γ находилось методом моментов путем численного решения в рамках специально созданного программного модуля уравнения

$$-\frac{1}{\gamma \text{Ei}(-\gamma\epsilon)} \exp(-\gamma\epsilon) = \bar{s},$$

где \bar{s} – средняя площадь озера.

С помощью того же модуля вычислялось значение критерия Пирсона, которое сравнивалось с критическим на уровне значимости 0.99. Результаты оценки согласия эмпирических и теоретических интегрально-экспоненциальных распределений по критерию Пирсона приведены в табл. 2. Из нее видно, что на уровне значимости 0.99 на шес-

ти участках из восьми распределение площадей термокарстовых озера, возникших в пределах основной поверхности ландшафта эрозионно-термокарстовых равнин, отвечает гипотезе о соответствии интегрально-экспоненциальному распределению. Распределение площадей термокарстовых озера, возникших в пределах поверхности термокарстовых понижений, при том же уровне значимости согласуется с интегрально-экспоненциальным распределением также на шести участках из восьми, причем в обоих случаях на участке 30 (район Пенжинской губы) соответствия не наблюдается.

На рис. 4 приведены графики распределения площадей термокарстовых озера первого и второго типа и хорошо отражены как разница распределений двух рассматриваемых групп, так и соответствие интегрально-экспоненциальному распределению.

На рис. 5 приведены результаты сравнения значений параметров распределений площадей термокарстовых озера, возникших на основной по-

Таблица 2. Результаты оценки согласия эмпирических и теоретических интегрально-экспоненциальных распределений по критерию Пирсона

Район	Участок	Средняя площадь озера, м ²	Объем выборки	Значение критерия		ε, м ²	γ, км ⁻²	
				Пирсона	критическое на уровне 0.99			
<i>Основная поверхность</i>								
Полуостров Ямал	20	120 564	86	7.678	6.635	2112	5.483	
	25	54 647	131	11.034	11.341	487	3.155	
	30	31 296	260	22.570	13.277	194	5.021	
Тазовский п-ов	19	51 774	87	5.537	9.210	473	3.271	
	Колымская низменность	21	300 137	252	5.413	15.086	6972	0.697
		22	638 574	113	4.870	11.341	7583	0.280
	28	568 958	125	2.200	6.635	6898	0.316	
Парапольский дол	40	27 753	350	13.143	13.277	217	5.917	
<i>Поверхность термокарстовых понижений</i>								
Полуостров Ямал	20	32 298	254	11.060	11.341	1307	7.573	
	25	35 507	116	9.814	15.086	1519	5.416	
	30	10 981	132	19.411	15.086	148	16.742	
Тазовский п-ов	19	13 197	105	13.054	9.210	90	12.12	
	Колымская низменность	21	110 604	172	5.843	9.210	662	1.412
		22	115 790	183	3.589	9.210	1037	1.457
	28	211 069	117	4.341	11.341	3274	0.899	
Парапольский дол	40	10 169	175	4.093	15.086	163	18.804	

Примечание. γ – оценка параметра средней плотности расположения истоков эрозионных форм; ε – оценка параметра первичного размера озера.

верхности ландшафта эрозионно-термокарстовых равнин, и озер, возникших на поверхности термокарстовых понижений, для одних и тех же участков. Сравнивались значения параметра γ, который, согласно модели, отвечает средней плотности расположения истоков эрозионных форм для соответствующей поверхности. Параметр ε как минимальное значение выборки более подвержен действию случайных факторов (например, зависит от объема выборки) и поэтому специально не анализировался.

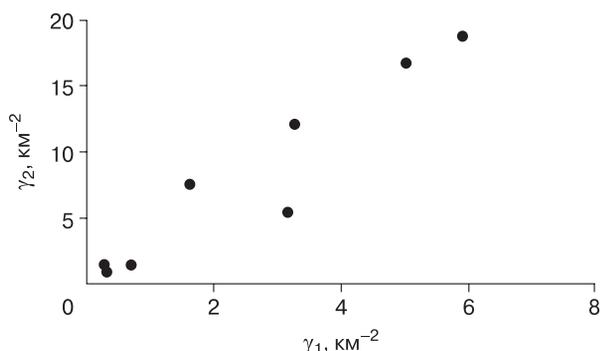


Рис. 5. Взаимосвязь оценок средней плотности расположения истоков эрозионных форм для разных типов поверхности эрозионно-термокарстовых равнин.

γ₁ – значения параметра для основной поверхности, γ₂ – для поверхности термокарстовых понижений.

Коэффициент корреляции между значениями γ₁ и γ₂ равен 0.95. Значения этого параметра для озер основной поверхности (γ₁) всегда меньше, чем для озер, возникших в термокарстовых понижениях (γ₂).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что термокарстовые озера, формирующиеся в пределах поверхности термокарстовых понижений, имеют распределение площадей, отличное от термокарстовых озер на основной поверхности ландшафта. Это иллюстрируется несовпадением графиков, при этом график распределения площади озер типа 1 находится на всех участках правее графика распределения площади озер типа 2. Это является следствием того, что доля озер малых размеров, расположенных в пределах кластеров термокарстовых понижений, значительно больше, чем аналогичных озер на основной поверхности. Различия распределений являются статистически достоверными и обнаружены на всех участках, кроме одного (25 – полуостров Ямал).

Распределение площадей термокарстовых озер, возникших в пределах основной поверхности, на 75 % участков отвечает интегрально-экспоненциальному. Это является, как обосновано ранее [Викторов и др., 2021], признаком динамиче-

ского равновесия, иначе говоря, баланса между появлением и ростом озер, с одной стороны, и их спуском эрозионными процессами – с другой. Этот вывод оказывается справедливым при условии справедливости предположений модели, в частности, о продолжающемся процессе возникновения новых озер. Данное предположение для основной поверхности является дискуссионным, и поэтому полученный вывод подлежит дальнейшему исследованию и не может быть признан окончательным.

На основе выявленного наличия интегрально-экспоненциального распределения, хотя и с другими значениями параметра γ , в пределах части ландшафта, занятой термокарстовыми понижениями, можно сделать вывод, что аналогичное динамическое равновесие устанавливается и на этой территории. Это также является следствием выполнения допущений модели, и в данном случае процесс появления новых озер обусловлен возникновением новых спущенных озерных котловин.

Различие значений параметра γ может быть объяснено тем, что в пределах поверхности, занятой термокарстовыми понижениями, истоков эрозионных форм заведомо больше, прежде всего за счет тех, которые ранее привели к возникновению уже существующих термокарстовых понижений, соответственно, больше γ . В то же время на каждом участке процессы на основной поверхности и на поверхности термокарстовых понижений происходят в одном ландшафте, относящемся к эрозионно-термокарстовой равнине, с едиными климатическими условиями; морфологические части в пределах ландшафта связаны разнообразными взаимодействиями, в частности перемещением вещества и энергии. Именно этим, на наш взгляд, можно объяснить четкую корреляцию значений параметра γ для озер первого типа и значений параметра γ для озер второго типа.

Анализ полученных результатов позволяет также заключить, что модель развития морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин должна учитывать выявленное различие формирования термокарстовых озер на водораздельной поверхности и на поверхности термокарстовых понижений.

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Сравнение распределений площадей термокарстовых озер на основной водораздельной поверхности эрозионно-термокарстовых равнин и вторичных озер на поверхности термокарстовых понижений показывает наличие статистически значимых различий, поэтому модель развития морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин должна базироваться на суще-

ствовании разных условий развития термокарстовых озер на основной поверхности равнины и поверхности термокарстовых понижений, часто формирующих кластеры.

2. На каждом из двух типов поверхности в пределах эрозионно-термокарстовых равнин в значительном числе случаев наблюдается формирование интегрально-экспоненциальных распределений площадей термокарстовых озер, хотя и различающихся между собой; это может интерпретироваться как признак установления динамического равновесия в процессах развития термокарстовых озер, по крайней мере в пределах поверхности термокарстовых понижений.

3. Наблюдается (при существенных различиях) коррелированность значений параметров распределений площадей термокарстовых озер на основной водораздельной поверхности эрозионно-термокарстовых равнин и вторичных озер на поверхности термокарстовых понижений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-17-00226П).

Литература

- Викторов А.С.** Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М., Наука, 2006, 252 с.
- Викторов А.С.** Математическая морфология ландшафтов криолитозоны / А.С. Викторов, В.Н. Капралова, Т.В. Орлов и др. М., РУДН, 2016, 232 с.
- Викторов А.С., Орлов Т.В., Капралова В.Н., Трапезникова О.Н.** Моделирование вариантов развития морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин // Криосфера Земли, 2021, т. XXV, № 1, с. 45–54.
- Геокриологическая карта СССР** м-ба 1:2 500 000. М., ГУГК, 1991, 16 л.
- Государственная геологическая карта РФ** м-ба 1:1 000 000 (новая серия), листы R-43-(45), R-(55)-57, R-(40)-42. СПб., ФГБУ ВСЕГЕИ, 2000.
- Государственная геологическая карта РФ** м-ба 1:1 000 000 (третье поколение). Сер. Западно-Сибирская, лист Q-43. СПб., ФГБУ ВСЕГЕИ, 2015.
- Государственная геологическая карта РФ** м-ба 1:1 000 000. Сер. Корякско-Курильская, лист P-5. СПб., ФГБУ ВСЕГЕИ, 2016.
- Кравцова В.И., Быстрова А.Г.** Изменение размеров термокарстовых озер в различных районах России за последние 30 лет // Криосфера Земли, 2009, т. XV, № 2, с. 16–26.
- Муратов И.Н., Ибраева А.Ш., Тимергазина Л.Л., Полищук Ю.М.** Дистанционное исследование термокарстовых озер арктической тундры Таймыра // Вестн. Югорского гос. ун-та, 2021, т. 17, № 1, с. 62–71.
- Полищук В.Ю.** Геоимитационное моделирование полей термокарстовых озер в зонах мерзлоты / В.Ю. Полищук, Ю.М. Полищук. Ханты-Мансийск, УИП ЮГУ, 2013, 129 с.
- Belshe F., Schuur E., Grosse G.** Quantification of upland thermokarst features with high resolution remote sensing // Environ. Res. Lett., 2013, vol. 8, p. 035016.
- Caël B., Seekell D.** The size-distribution of Earth's lakes // Scientific Rep., 2016, vol. 6, p. 29633.
- Chen M., Rowland J., Wilson C. et al.** Temporal and spatial pattern of thermokarst lake area changes at Yukon Flats, Alaska // Hydrol. Process., 2014, vol. 28, p. 3.

Grosse G., Jones B.M., Nitze I. et al. Massive thermokarst lake area loss in continuous ice-rich permafrost of the northern Seward Peninsula, Northwestern Alaska, 1949–2015 // XI Intern. Conf. on Permafrost: Abstracts (Potsdam, 20–24 June 2016). Potsdam, Germany, 2016, p. 739–740.

Jones B.M., Grosse G., Arp C. et al. Modern thermokarst lake dynamics in the continuous permafrost zone, northern Seward Peninsula Alaska // J. Geophys. Res.: Biogeosciences, 2011, vol. 116, No. G2, p. 1–13.

Lantz T.C., Turner K.W. Changes in lake area in response to thermokarst processes and climate in Old Crow Flats Yukon // J. Geophys. Res.: Biogeosciences, 2015, vol. 120, No. 3, p. 513–524.

Morgenstern A., Grosse G., Günther F. et al. Spatial analyses of thermokarst lakes and basins in Yedoma landscapes of the Lena Delta // The Cryosphere Discussions, 2011, vol. 5, p. 1495–1545.

Olefeldt D., Goswami S., Grosse G. et al. Circumpolar distribution and carbon storage of thermokarst landscapes // Nature Communications, 2016, vol. 7, p. 13043.

Polishchuk Y., Bogdanov A., Muratov I. et al. Minor contribution of small thaw ponds to the pools of carbon and methane in the inland waters of the permafrost-affected part of western Siberian Lowland // Environ. Res. Lett., 2018, vol. 13, p. 1–16.

Smith L.C., Sheng Y., Macdonald G.M., Hinzman L.D. Disappearing Arctic Lakes // Science, 2005, vol. 308, No. 3, p. 14.

Veremeeva A., Nitze I., Günther F. et al. Geomorphological and Climatic Drivers of Thermokarst Lake Area Increase Trend (1999–2018) in the Kolyma Lowland Yedoma Region North-Eastern Siberia // Remote Sens., 2021, vol. 13, p. 178.

Verpoorter C., Kutser T., Seekell D., Tranvik L. A global inventory of lakes based on High-Resolution Satellite Imagery // Geophys. Res. Lett., 2014, vol. 41, iss. 18, p. 6396–6402.

Victorov A.S. Mathematical models of thermokarst erosion plains // GIS and Spatial Analysis: Proc. of IAMG'05 (Toronto, Canada, August 21–26, 2005). Toronto, 2005, vol. I, p. 62–67.

Wei Z., Du Z., Wang L. et al. Sentinel-based inventory of thermokarst lakes and ponds across permafrost landscapes on the Qinghai-Tibet Plateau // Earth and Space Sci., 2021, vol. 8, p. 11.

References

Victorov A.S. Osnovnye problemy matematicheskoi morfologii landshafta [The main problems of mathematical morphology of landscape]. Moscow, Nauka, 2006, 252 p. (in Russian).

Victorov A.S., Kapralova V.N., Orlov T.V. et al. Matematicheskaya vorfologiya landshavtov kriolitozony [Mathematical morphology of cryolithozone landscapes]. Moscow, RUDN, 2016, 232 p. (in Russian).

Victorov A.S., Orlov T.V., Kapralova V.N., Trapeznikova O.N. Modeling the ways of the morphological pattern development for thermokarst plains with fluvial erosion. Earth's Cryosphere, 2021, vol. XXV, No. 1, p. 40–47.

Permafrost map of USSR scale 1:2 500 000. Moscow, GUGK, 1991, 16 p.

State Geological Map of the Russian Federation scale of 1:1 000 000 (new series), R-43-(45), R-(55)-57, R-(40)-42. Sankt-Petersburg, VSEGEI, 2000.

State Geological Map of the Russian Federation scale of 1:1 000 000 (third generation), Zapadno-Sibirskaya series, Q-43. Sankt-Petersburg, VSEGEI, 2015.

State Geological Map of the Russian Federation scale of 1:1 000 000. Koryaksko-Kuril'skaya series, P-5. Sankt-Petersburg, VSEGEI, 2016.

Kravtsova V.I., Bystrova A.G. Changes in thermokarst lake size in different regions of Russia for the last 30 years. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2009, vol. XIII, No. 2, p. 16–26.

Muratov I., Ibraeva A., Timergazina L., Polishchuk Y. Remote study of thermokarst lakes in the arctic tundra of the Taimyr. Yugra State University Bulletin, 2021, vol. 60, p. 62–71, DOI: 10.17816/byusu20210162-71.

Polishchuk V.Yu., Polishchuk Yu.M. Geoimitationnoe modelirovanie polei termokarstovykh ozer v zonakh merzloty [Geosimulation modeling of fields of thermokarst lakes in permafrost zones]. Khanty-Mansiysk, UIP YuGU, 2013, 129 p. (in Russian).

Belshe F., Schuur E., Grosse G. Quantification of upland thermokarst features with high resolution remote sensing. Environmental Research Letters, 2013, vol. 8, p. 035016, DOI: 10.1088/1748-9326/8/3/035016.

Cael B., Seekell D. The size-distribution of Earth's lakes. Scientific Reports, 2016, vol. 6, p. 29633, DOI: 10.1038/srep29633.

Chen M., Rowland J., Wilson C. et al. Temporal and spatial pattern of thermokarst lake area changes at Yukon Flats, Alaska. Hydrological Processes, 2014, vol. 28, p. 3, DOI: 10.1002/hyp.9642.

Grosse G., Jones B.M., Nitze I. et al. Massive thermokarst lake area loss in continuous ice-rich permafrost of the northern Seward Peninsula, Northwestern Alaska, 1949–2015. In: XI International Conference on Permafrost: Abstracts (Potsdam, 20–24 June 2016). Potsdam, Germany, 2016, p. 739–740.

Jones B.M., Grosse G., Arp C. et al. Modern thermokarst lake dynamics in the continuous permafrost zone, northern Seward Peninsula Alaska. J. Geophysical Research: Biogeosciences, 2011, vol. 116, No. G2, p. 1–13, DOI: 10.1029/2011jg001666.

Lantz T.C., Turner K.W. Changes in lake area in response to thermokarst processes and climate in Old Crow Flats Yukon. J. Geophysical Research: Biogeosciences, 2015, vol. 120, No. 3, p. 513–524.

Morgenstern A., Grosse G., Günther F. et al. Spatial analyses of thermokarst lakes and basins in Yedoma landscapes of the Lena Delta. The Cryosphere Discussions, 2011, vol. 5, p. 1495–1545, DOI: 10.5194/tcd-5-1495-2011.

Olefeldt D., Goswami S., Grosse G. et al. Circumpolar distribution and carbon storage of thermokarst landscapes. Nature Communications, 2016, vol. 7, DOI: 10.1038/ncomms13043.

Polishchuk Y., Bogdanov A., Muratov I. et al. Minor contribution of small thaw ponds to the pools of carbon and methane in the inland waters of the permafrost-affected part of western Siberian Lowland. Environmental Research Letters, 2018, vol. 13, p. 1–16, DOI: 10.1088/1748-9326/aab046.

Smith L.C., Sheng Y., Macdonald G.M., Hinzman L.D. Disappearing Arctic Lakes. Science, 2005, vol. 308, No. 3, p. 14.

Veremeeva A., Nitze I., Günther F. et al. Geomorphological and Climatic Drivers of Thermokarst Lake Area Increase Trend (1999–2018) in the Kolyma Lowland Yedoma Region North-Eastern Siberia. Remote Sens., 2021, vol. 13, p. 178. – <https://doi.org/10.3390/rs13020178>

Verpoorter C., Kutser T., Seekell D., Tranvik L. A global inventory of lakes based on High-Resolution Satellite Imagery. Geophysical Research Letters, 2014, vol. 41, p. 6396–6402, DOI: 10.1002/2014GL060641.

Victorov A.S. Mathematical models of thermokarst erosion plains. In: GIS and spatial analysis: Proc. of IAMG'05 (Toronto, Canada, August 21–26, 2005). Toronto, 2005, vol. I, p. 62–67.

Wei Z., Du Z., Wang L. et al. Sentinel-based inventory of thermokarst lakes and ponds across permafrost landscapes on the Qinghai-Tibet Plateau. Earth and Space Science, 2021, vol. 8, p. 11, DOI: 10.1029/2021EA001950.

*Поступила в редакцию 24 марта 2022 г.,
после доработки – 13 июля 2022 г.,
принята к публикации 8 февраля 2023 г.*