

УДК 551.435

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОЩАДЕЙ ОЗЕР ЭРОЗИОННО-ТЕРМОКАРСТОВЫХ РАВНИН

© 2020 г. А. С. Викторов<sup>1</sup>, Т. В. Орлов<sup>1</sup>, О. Н. Трапезникова<sup>1</sup>,  
В. Н. Капралова<sup>1</sup>, М. В. Архипова<sup>1,\*</sup>

Представлено академиком РАН В.И. Осиповым 07.02.2020 г.

Поступило 07.02.2020 г.

После доработки 11.02.2020 г.

Принято к публикации 12.02.2020 г.

Целью исследований было изучение закономерностей, которым подчиняются размеры озер в пределах эрозионно-термокарстовых равнин применительно к оценке природных опасностей. Согласно развитой ранее модели морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин при условии асинхронного старта термокарстовых процессов в условиях слабых климатических изменений и длительного времени развития, территория оказывается в состоянии динамического равновесия; при этом распределение площадей озер должно подчиняться интегрально-экспоненциальному распределению. Для экспериментального исследования были выбраны ключевые участки в различных регионах разнообразные в геокриологическом и физико-географическом отношении, для которых на базе космических снимков высокого разрешения была проведена проверка соответствия распределения площадей озер разным типам распределений. В результате получено, что на однородных участках эрозионно-термокарстовых равнин с различными физико-географическими условиями в подавляющем большинстве случаев справедлив интегрально-экспоненциальный закон распределения площадей термокарстовых озер. Это подтверждает использованную модель и показывает, что морфологическая структура эрозионно-термокарстовых равнин находится в состоянии динамического равновесия.

**Ключевые слова:** хасырей, эрозионная сеть, математическая модель морфологической структуры ландшафта, логнормальное распределение, интегрально-экспоненциальное распределение

DOI: 10.31857/S2686739720040192

Ландшафт эрозионно-термокарстовые равнины представляет собой слабоволнистую субгоризонтальную поверхность с преобладанием различной тундровой растительности с вкраплениями многочисленных озер и хасыреев, которые имеют изометричную, часто округлую форму и беспорядочно разбросаны по равнине, местами развита нечастая эрозионная сеть (рис. 2а). Этот ландшафт широко распространен на многих территориях Западной и Восточной Сибири, севера Канады, Аляски. Исследование термокарстовых озер проводилось значительным количеством исследователей ([1–5] и др.), в то же время изучение распределений озер на основе теоретической модели не производилось, а носило только эмпирический характер.

Цель настоящих исследований — изучение закономерностей, которым подчиняются размеры

озер в пределах эрозионно-термокарстовых равнин.

Согласно развитой ранее модели морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин при условии асинхронного старта термокарстовых процессов в условиях слабых климатических изменений и длительного времени развития при соблюдении определенных условий [3], территория оказывается в состоянии динамического равновесия; при этом распределение площадей озер должно подчиняться интегрально-экспоненциальному распределению

$$f_{sl}(x, \infty) = -\frac{1}{xEi(-\gamma\epsilon)} e^{-\gamma x}, \quad x \geq \epsilon,$$

где  $\epsilon$  — начальный размер озера,  $\gamma$  — средняя плотности расположения истоков эрозионных форм,  $Ei(-x)$  — интегрально-экспоненциальная функция.

Для экспериментального исследования были выбраны ключевые участки в различных регионах разнообразные в геокриологическом и физико-географическом отношении (рис. 1). Они

<sup>1</sup> Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: masha-a@yandex.ru



Рис. 1. Схема ключевых участков эрозивно-термокарстовых равнин.

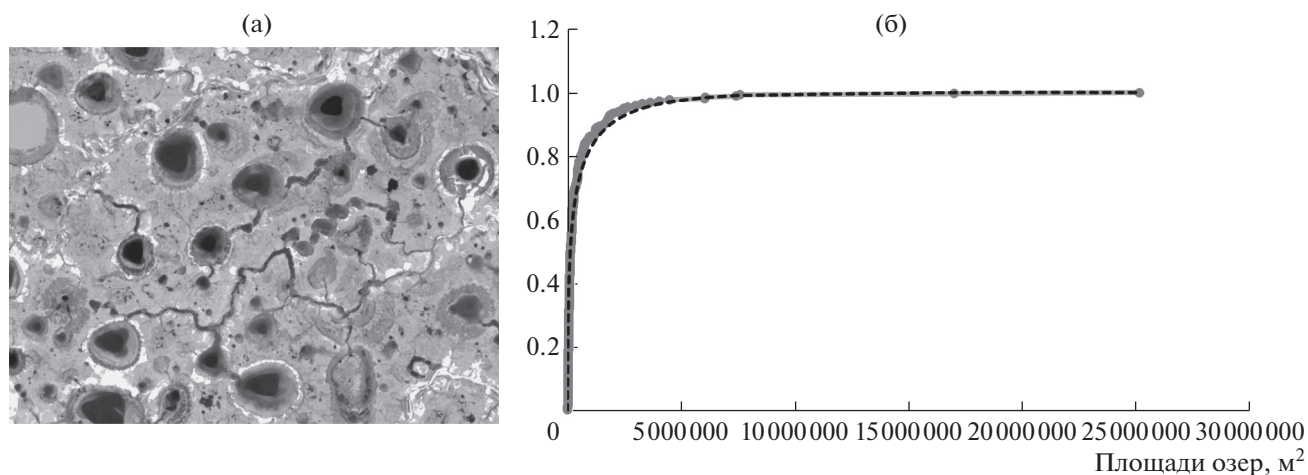


Рис. 2. Типичное изображение эрозивно-термокарстовой равнины на космическом снимке (а) и пример соответствия эмпирического распределения (серая линия) площадей озер теоретическому интегрально-экспоненциальному распределению (черная пунктирная линия) (б) – участок 28.

представляют собой тундровые равнины, образованные среднечетвертичными отложениями с различным содержанием льда, и расположены на морских и речных террасах.

В качестве исходных были использованы материалы космической съемки с разрешением на местности 5–30 м; для 17 участков были проведены проверки только на основе современной съемки (срок 2), и из них для 11 участков были проведены проверки по двум срокам (период 38–56 лет). Методика обработки включала выбор эталонных участков на основе анализа генетической, ландшафтной и геологической однородности, по снимкам и дополнительным источникам

геологической информации, выделение озер, определение их площадей и проверка соответствия распределения площадей разным типам распределений, в том числе интегрально-экспоненциальному с использованием критерия Пирсона. При этом за оценку параметра  $\epsilon$  принималось минимальное значение выборки, а значение  $\gamma$  находилось методом моментов путем численного решения в рамках специально созданного программного модуля уравнения

$$-\frac{1}{\gamma E i(-\gamma \epsilon)} e^{-\gamma \epsilon} = \bar{s},$$

**Таблица 1.** Таблица соответствия теоретических и эмпирических распределений площадей термокарстовых озер по критерию Пирсона\*

Участок–срок, объем выборки	13-2 581	13-1 598	14-2 209	17-2 232	18-2 62	19-2 161	19-1 160	20-2 318	20-1 359	21-2 405
Логнормальное	0.000	0.000	<b>0.014</b>	0.005	<b>0.160</b>	<b>0.017</b>	<b>0.091</b>	0.007	0.000	0.000
Гамма-распределение	0.000	0.000	<b>0.017</b>	0.000	<b>0.018</b>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Нормальное	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Интегрально-экспоненциальное	0.000	0.000	<b>0.022</b>	0.002	<b>0.086</b>	<b>0.213</b>	<b>0.394</b>	0.000	0.000	<b>0.109</b>
Участок–срок, объем выборки	21-1 339	22-2 244	22-1 337	23-2 257	24-2 346	24-1 376	25-2 278	25-1 281	26-2 500	28-2 264
Логнормальное	<b>0.010</b>	0.000	0.000	<b>0.044</b>	0.004	0.001	<b>0.225</b>	<b>0.265</b>	0.008	<b>0.310</b>
Гамма-распределение	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Нормальное	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Интегрально-экспоненциальное	0.004	<b>0.014</b>	<b>0.641</b>	<b>0.220</b>	<b>0.663</b>	<b>0.024</b>	0.000	0.000	0.001	<b>0.053</b>
Участок–срок, объем выборки	28-1 267	30-2 519	30-1 519	31-2 74	31-1 70	32-2 430	32-1 439		40-2 535	
Логнормальное	<b>0.122</b>	<b>0.322</b>	<b>0.710</b>	0.000	0.000	0.000	0.000		0.001	
Гамма-распределение	0.000	0.000	0.000	<b>0.015</b>	0.000	0.000	0.000		0.000	
Нормальное	0.000	0.000	0.000	0.000	<b>0.018</b>	0.000	0.000		0.000	
Интегрально-экспоненциальное	<b>0.085</b>	<b>0.245</b>	<b>0.023</b>	0.005	0.001	0.000	0.000		<b>0.122</b>	

Примечание. \* в таблице приведены значения  $p$  – величины дополнительной к квантилю, соответствующему фактическому значению критерия; жирным шрифтом выделены случаи согласия с проверяемым теоретическим распределением.

где  $\bar{s}$  – средняя площадь озера. Выборки имели объем от 62 до 598 озер.

Анализ результатов (табл. 1) показывает, что для срока 2 на 10 участках из 17 (59%) наблюдается соответствие эмпирических распределений интегрально-экспоненциальному распределению (рис. 2б), что соответствует модели асинхронного старта; для срока 1 соответствие наблюдается на 5 участках из 11 (45%). Одновременно на 8 участках из 17 распределение площадей озер отвечает логнормальному распределению, характерному для озерно-термокарстовых равнин. Это вполне объясняется двумя факторами:

– Эрозионно-термокарстовые равнины на начальных стадиях представляли собой озерно-термокарстовые равнины, так как вероятность спуска озер при их изначально ограниченных размерах была невелика, а для озерно-термокарстовых равнин характерно логнормальное распределение площадей озер [2, 3];

– Интегрально-экспоненциальное распределение является предельным распределением при  $t \rightarrow \infty$ , а прошедшее с начала термокарстового процесса время является хотя и большим, но конечным.

## ВЫВОДЫ

1. На однородных участках эрозионно-термокарстовых равнин с различными физико-географическими условиями в подавляющем большинстве случаев справедлив интегрально-экспоненциальный закон распределения площадей термокарстовых озер.

2. Интегрально-экспоненциальный закон распределения площадей озер подтверждает существующую математическую модель морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин.

3. Интегрально-экспоненциальный закон распределения площадей озер указывает на то, что морфологическая структура эрозионно-термокарстовых равнин находится в состоянии динамического равновесия.

4. Оценка вероятности поражения инженерного сооружения (природной опасности) должна исходить из постоянства параметров территории, характерного для состояния динамического равновесия.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в рамках государственного задания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Burn C.R., Smith M.W.* Development of Thermokarst Lakes During the Holocene at Sites Near Mayo, Yukon Territory. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1990, V. 1. P. 161–176.
2. *Викторов А.С.* Математическая модель термокарстовых озерных равнин как одна из основ интерпретации материалов космических съемок // Исследования Земли из космоса. 1995. № 5. С. 42–50.
3. *Викторов А.С.* Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука. 2006. 252 с.
4. *Днепровская В.П., Брыксина Н.А., Полищук Ю.М.* Изучение изменений термокарста в зоне прерывистого распространения вечной мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // Исследования Земли из космоса. 2009. № 4. С. 1–9.
5. *Кравцова В.И., Быстрова А.Г.* Изучение изменений распространения термокарстовых озер России по разновременным космическим снимкам // Криосфера Земли. 2009. Т. 15. № 2. С. 16–26.

## DISTRIBUTION LAWS FOR LAKE AREAS WITHIN THERMOKARST PLAINS WITH FLUVIAL EROSION

**A. S. Victorov<sup>a</sup>, T. V. Orlov<sup>a</sup>, O. N. Trapeznikova<sup>a</sup>, V. N. Kapralova<sup>a</sup>, and M. V. Arkhipova<sup>a,#</sup>**

<sup>a</sup> *Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>#</sup> *E-mail: masha-a@yandex.ru*

Presented by Academician of the RAS V.I. Osipov February 7, 2020

The goal of the research is to study laws regulating lake sizes within thermokarst plains with fluvial erosion. According to the previously developed model of the landscape morphological patterns, the thermokarst plains with fluvial erosion in case of asynchronous start of thermokarst under slight climate change and a long period of development come to the state of the dynamic balance; at that the lake area distribution should obey the integral exponential law. The key sites for empirical testing are taken in different regions with various permafrost and natural characteristics. We tested the conformity of the distribution of lake areas to different types of distributions using high resolution airborne and space images. The results show that the integral exponential law for the lake areas is valid for homogenous sections of the thermokarst plains with fluvial erosion in the majority of natural conditions. This result confirms the used model and demonstrates that the morphological pattern of the thermokarst plains with fluvial erosion is in the dynamic balance state.

*Keywords:* khasyrei, fluvial network, mathematical model of a landscape morphological pattern, lognormal distribution, integral exponential distribution