

УДК 551.435

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ ХАСЫРЕЕВ

А. С. Викторов, Т. В. Орлов, М. В. Архипова\*

Представлено академиком РАН В.И. Осиповым 20.12.2018 г.

Поступило 20.12.2018 г.

Представлены результаты эмпирической проверки теоретической закономерности, обоснованной в математической модели морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин, — экспоненциального распределения площадей хасыреев. Проверка данного утверждения проведена на 18 участках, расположенных в различных регионах криолитозоны в разных физико-географических условиях с использованием материалов космических снимков высокого разрешения. В 80% выборки гипотеза подтверждается. Это подтверждает разработанную модель и позволяет сделать вывод о том, что распределение радиусов хасыреев в различных условиях отвечает распределению Рэлея.

*Ключевые слова:* эрозионно-термокарстовые равнины, математическая модель морфологической структуры, синхронный и асинхронный старт, экспоненциальное распределение, распределение Рэлея.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524886655-657>

Типичным ландшафтом многих территорий Западной и Восточной Сибири, севера Канады, Аляски являются эрозионно-термокарстовые равнины. Исследуемый тип территорий представляет собой слабоболнистую субгоризонтальную поверхность с преобладанием различной тундровой растительности, в которую вкраплены озёра и хасыреи, которые имеют изометричную, часто округлую форму и беспорядочно разбросаны по равнине, а также местами развита нечастая эрозионная сеть. Морфологическая структура термокарстовых равнин изучалась значительным количеством исследователей ([1–5] и др.), в то же время морфометрическое изучение хасыреев, являющихся типичным элементом этих равнин, практически не проводилось.

Целью исследований явилось изучение закономерностей, которым подчиняются размеры хасыреев в пределах эрозионно-термокарстовых равнин.

Согласно развитой модели морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин при условии синхронного старта термокарстовых процессов в условиях слабых климатических изменений [3], распределение площадей хасыреев должно подчиняться экспоненциальному распределению:

$$F(x) = 1 - e^{-\gamma x},$$

где  $\gamma$  — средняя плотность расположения истоков эрозионных форм. При анализе модели морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин в условиях асинхронного старта показано [3], что при соблюдении определённых условий территория ока-

зывается в состоянии с элементами динамического равновесия, в частности, оно характеризуется предельным распределением площадей хасыреев, которое также является экспоненциальным.

Для экспериментального исследования были выбраны 18 участков в различных регионах (рис. 1). В качестве исходных были использованы материалы космической съёмки с разрешением на местности 5–30 м. Методика обработки включала выбор эталонных участков, выделение хасыреев, определение их площадей и проверку соответствия распределения хасыреев либо логнормальному, либо экспоненциальному распределению.

Выбор участков осуществлялся визуально по материалам космической съёмки, литературным и картографическим данным. Главным требованием являлась генетическая, ландшафтная и морфологическая однородность, достигавшаяся путём анализа снимков и дополнительных источников информации (рис. 2а). Таким образом, из участков исключались территории с иным происхождением озёр, как правило, выражавшимся в их морфологии — (например, аллювиальных равнин). В итоге выбраны участки, разнообразные в геокриологическом и физико-географическом отношении (рис. 1). Они представляют собой тундровые равнины, образованные среднечетвертными отложениями с различным содержанием льда и расположенные на морских и речных террасах.

Выделение хасыреев производилось на основе программных модулей QGIS в ручном режиме, затем выполнялось определение площадей. Проверка соответствия эмпирически полученных распределений теоретическим производилась с помощью программного пакета статистического анализа с использованием

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской Академии наук, Москва

\*E-mail: [masha-a@yandex.ru](mailto:masha-a@yandex.ru)

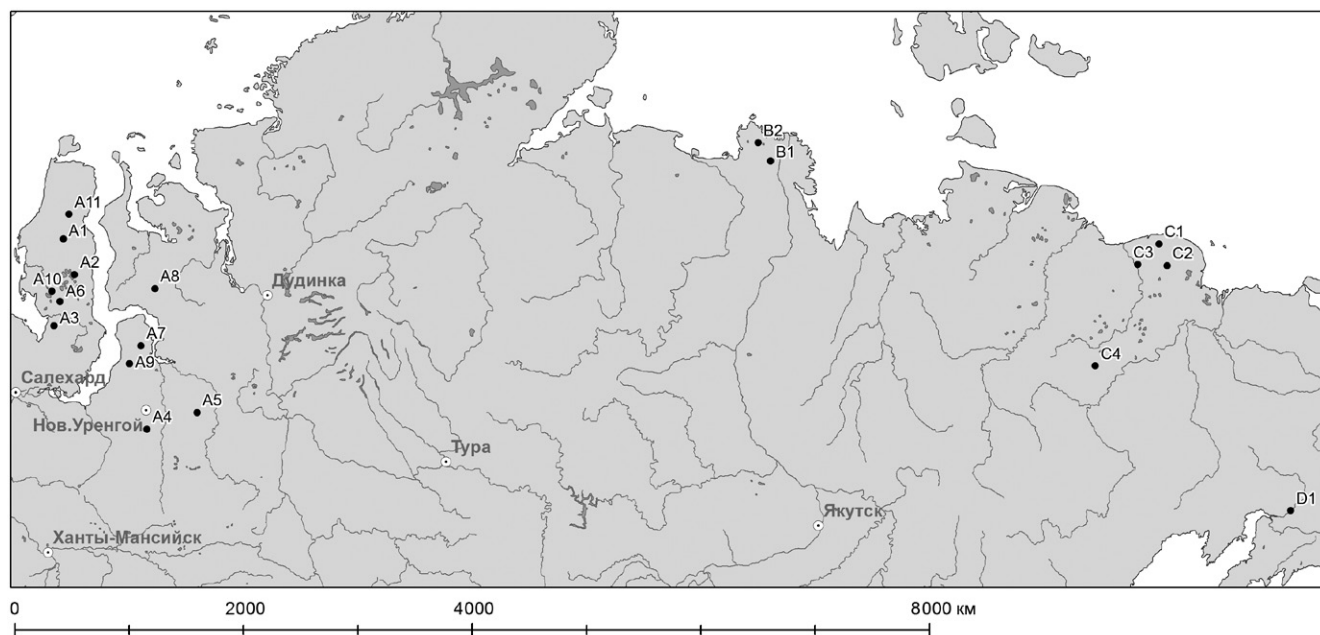


Рис. 1. Схема ключевых участков эрозионно-термокарстовых равнин.

Таблица 1. Таблица соответствия теоретических и эмпирических законов распределения площадей хасыреев (критерий Пирсона)

Участки, объём выборки	B1, 90	B2, 114	A8, 93	A7, 127	C2, 352	C1, 89	A1, 97	A2, 62	A3, 97
Типы распределений									
Логнормальное распределение	0,077	0,045	0,522	0,000	0,237	0,248	0,766	0,108	0,670
Экспоненциальное распределение	0,005	0,034	0,390	0,084	0,000	0,749	0,179	0,000	0,539
Участки, объём выборки	A4, 43	A5, 49	C3, 176	A6, 143	D1, 85	A9, 73	A10, 122	A11, 76	C4, 178
Логнормальное распределение	0,292	0,444	0,076	0,893	0,661	0,044	0,353	0,012	0,552
Экспоненциальное распределение	0,447	0,281	0,372	0,153	0,225	0,191	0,396	0,723	0,001

критерия Пирсона (хи-квадрат). Полученные данные включали выборки объёма от 43 до 352 хасыреев.

Анализ результатов (рис. 26) показывает, что на уровне значимости 0,99 на 14 участках данные согласуются с гипотезой об экспоненциальном характере распределения площадей хасыреев (табл. 1). Таким образом можно сделать вывод, что ведущее значение в формировании количественных параметров хасыреев имеет не рост озера, а распределение эрозионных форм (пуассоновское распределение их истоков – [3]). С логнормальным распределением сходство отмечается тоже на 13 участках. Это можно объяснить тем, что хасыреи рождаются из озёр, площадь которых в пределах озёрно-термокарстовых равнин имеет логнормальное распределение [2, 3].

В таблице приводятся значения  $p$  – величины, дополнительной к квантилю, соответствующей фактическому значению критерия; гипотеза согласуется с выборкой на уровне 0,99 если  $p$  больше или равно 0,01.

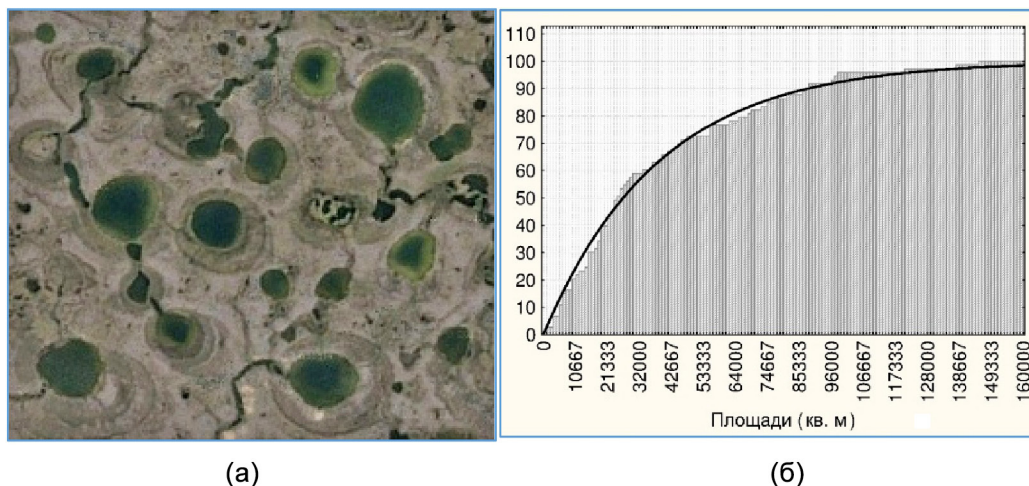
Нетрудно аналитически получить, что соответствие распределения площадей хасыреев экспоненциальному закону означает, что распределение их средних радиусов и диаметров должно отвечать распределению Рэля.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

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

Экспоненциальное распределение площадей хасыреев подтверждает существующие математические модели морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин.

Распределение средних радиусов и диаметров хасыреев должно отвечать распределению Рэля.



**Рис. 2.** Типичное изображение участка эрозионно-термокарстовой равнины на космическом снимке (а) и пример соответствия эмпирических законов распределения площадей хасыреев экспоненциальному распределению (б – участок А9).

**Источник финансирования.** Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ № 18–17–00226.

#### 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 // *Исслед. Земли из космоса*. 1995. № 5. С. 42–50.
3. *Викторов А.С., Орлов Т.В., Капралова В.Н. и др.* Математическая морфология ландшафтов криолитозоны. М.: РУДН, 2016. 232 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 // *Исслед. 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.

## LAWS FOR THE SIZE DISTRIBUTION OF KHASYREIS

**A. S. Victorov, T. V. Orlov, M. V. Arkhipova**

*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS V.I. Osipov December 20, 2018

Received December 20, 2018

The paper presents the results of empirical verification of the theoretical law, validated in a mathematical model of the morphological structure of thermokarst plains with fluvial erosion - the exponential distribution of the areas of khasyreis. The empirical testing based on the remote sensing data of high resolution involved 18 key sites at different regions of the cryolithozone in different natural environments. Eighty percent of the testing samples confirmed this theoretical statement. This result validates the suggested model and provides for the conclusion about the khasyreis radii corresponding to the Rayleigh distribution in different natural environments.

**Keywords:** thermokarst plains with fluvial erosion, a mathematical model of the morphological pattern, synchronous and asynchronous start, an exponential distribution, the Rayleigh distribution.