

УДК 551.435

## ВЗАИМОСВЯЗИ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОЩАДЕЙ ОЗЕР И ХАСЫРЕЕВ В ЛАНДШАФТАХ ЭРОЗИОННО-ТЕРМОКАРСТОВЫХ РАВНИН

© 2021 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 13.05.2021 г.

Поступило 13.05.2021 г.

После доработки 15.06.2021 г.

Принято к публикации 16.06.2021 г.

Целью проведенных исследований было изучение взаимосвязей количественных характеристик площадей озер и площадей хасыреев 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, территория оказывается в состоянии динамического равновесия; при этом распределение площадей озер должно подчиняться интегрально-экспоненциальному распределению. Отсюда аналитически можно получить, что отношение среднего квадрата площади термокарстовых озер к их средней площади равно средней площади хасыреев. Для экспериментального исследования были выбраны 11 ключевых участков в различных регионах разнообразные в гео-криологическом и физико-географическом отношении, на которых на базе космических снимков высокого разрешения была проведена проверка обоснованной зависимости. В результате получено, что на однородных участках эрозионно-термокарстовых равнин, находящихся в состоянии динамического равновесия, в подавляющем большинстве случаев указанная зависимость находит эмпирическое подтверждение.

*Ключевые слова:* хасырей, термокарстовое озеро, эрозионно-термокарстовая равнина, математическая модель морфологической структуры ландшафта, взаимосвязь площадей озер и хасыреев, интегрально-экспоненциальное распределение, динамическое равновесие

DOI: 10.31857/S2686739721100182

Ландшафт эрозионно-термокарстовых равнин представляет собой слабоволнистую субгоризонтальную поверхность с преобладанием тундровой растительности с вкраплениями многочисленных озер и хасыреев, которые имеют изометричную, часто округлую форму и беспорядочно разбросаны по равнине, а также местами развита нечастая эрозионная сеть (рис. 1). Это – типичный ландшафт севера Западной и Восточной Сибири, Канады, Аляски. Исследование термокарстовых озер и хасыреев проводилось значительным количеством исследователей ([1–7] и др.), в то же время не производилось изучение взаимосвязей количественных характеристик площадей озер и площадей хасыреев.

Цель настоящих исследований – изучение взаимосвязей количественных характеристик площадей озер и площадей хасыреев в пределах эрозионно-термокарстовых равнин.

Согласно развитой ранее модели морфологической структуры эрозионно-термокарстовых

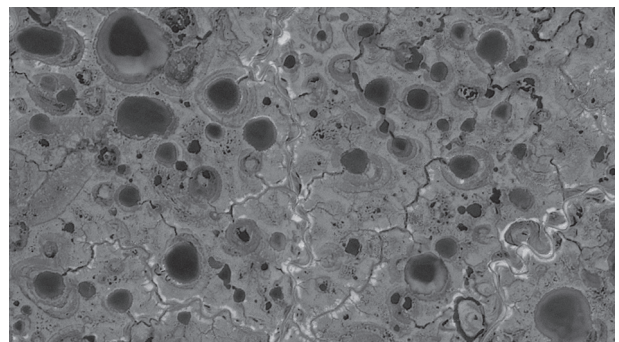
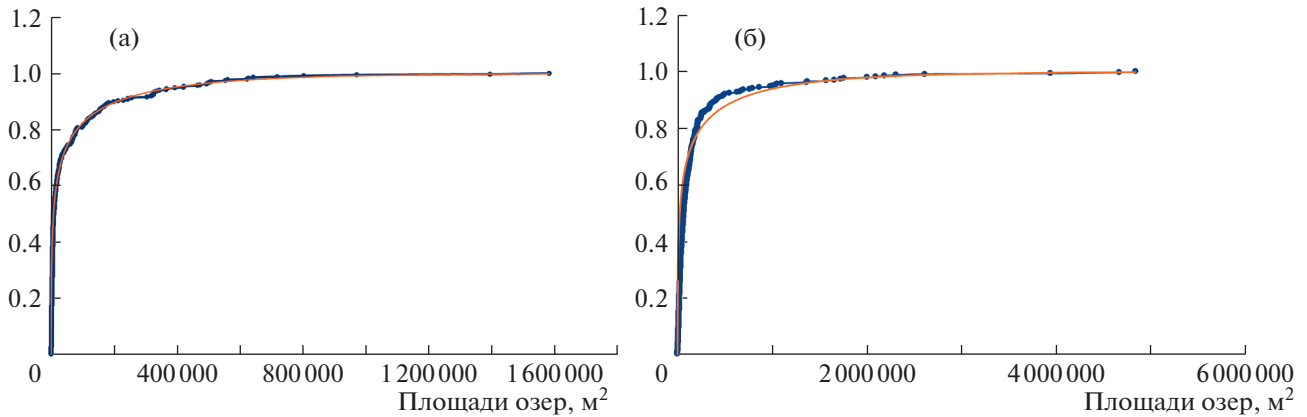


Рис. 1. Типичное изображение эрозионно-термокарстовой равнины на космическом снимке.

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

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



**Рис. 2.** Пример соответствия эмпирического распределения (синяя линия) площадей озера теоретическому интегрально-экспоненциальному распределению (рыжая линия) (а – участок 24, б – участок 21).

равнин [2] при условии асинхронного старта термокарстовых процессов в условиях слабых климатических изменений и длительного времени развития некоторых слабых условий, территория оказывается в состоянии динамического равновесия; при этом распределение площадей озера должно подчиняться специальному виду распределения, которое было названо интегрально-экспоненциальным [3] (рис. 2) с плотностью распределения, отвечающей выражению

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

со средней площадью озера (математическим ожиданием) и моментом второго порядка соответственно

$$s_l = -\frac{1}{\gamma \text{Ei}(-\gamma \epsilon)} e^{-\gamma \epsilon} \quad (2)$$

$$\text{и } M_l^2 = -\frac{1}{\gamma \text{Ei}(-\gamma \epsilon)} e^{-\gamma \epsilon} \left( \epsilon + \frac{1}{\gamma} \right),$$

где  $\epsilon$  – начальный размер термокарстового озера,  $\gamma$  – средняя плотность расположения истоков эрозионных форм,  $\text{Ei}(-x)$  – интегрально-экспоненциальная функция.

Распределение площадей хасыреев при этих же условиях должно подчиняться экспоненциальному распределению [2], плотность вероятности которого, с учетом минимального размера первичного термокарстового очага, дается выражением

$$f_{sh}(x, \infty) = \gamma e^{-\gamma(x-\epsilon)}, \quad x \geq \epsilon \quad (3)$$

со средней площадью хасырея

$$s_h = \epsilon + \frac{1}{\gamma}. \quad (4)$$

Из приведенного следует, что для эрозионно-термокарстовых равнин при условии асинхрон-

ного старта термокарстовых процессов, относительно слабых климатических изменений и длительного времени развития при широком спектре условий должна существовать следующая зависимость между количественными характеристиками площадей термокарстовых озера и площадей хасыреев

$$s_h = \frac{M_l^2}{s_l}. \quad (5)$$

Иначе говоря, средняя площадь хасырея должна быть равна (с учетом статистических колебаний) отношению среднего квадрата площади термокарстового озера к средней площади озера.

Для экспериментального исследования были выбраны ключевые участки в различных регионах, разнообразные в геокриологическом и физико-географическом отношении (рис. 3). Они представляют собой равнинные участки тундры, приуроченные к морским и речным террасам и сложенные с поверхности среднечетвертичными отложениями с различным содержанием льда.

В качестве исходных данных были использованы материалы современной космической съемки с разрешением на местности 0.5–5 м (снимки со спутников IKONOS, QuickBird, Worldview 2, Geoeye-1, Pleidas, SPOT-5, SPOT-6). Методика обработки включала выбор эталонных участков, на основе анализа генетической, ландшафтной и геологической однородности, по снимкам и дополнительным источникам геологической информации, выделение озера и хасыреев, определение их площадей и проверка соответствия распределения площадей разным типам распределений, в том числе интегрально-экспоненциальному с использованием критерия Пирсона. Для участков, где было обнаружено соответствие интегрально-экспоненциальному распределению (данные приведены в [3]), были получены значения сред-

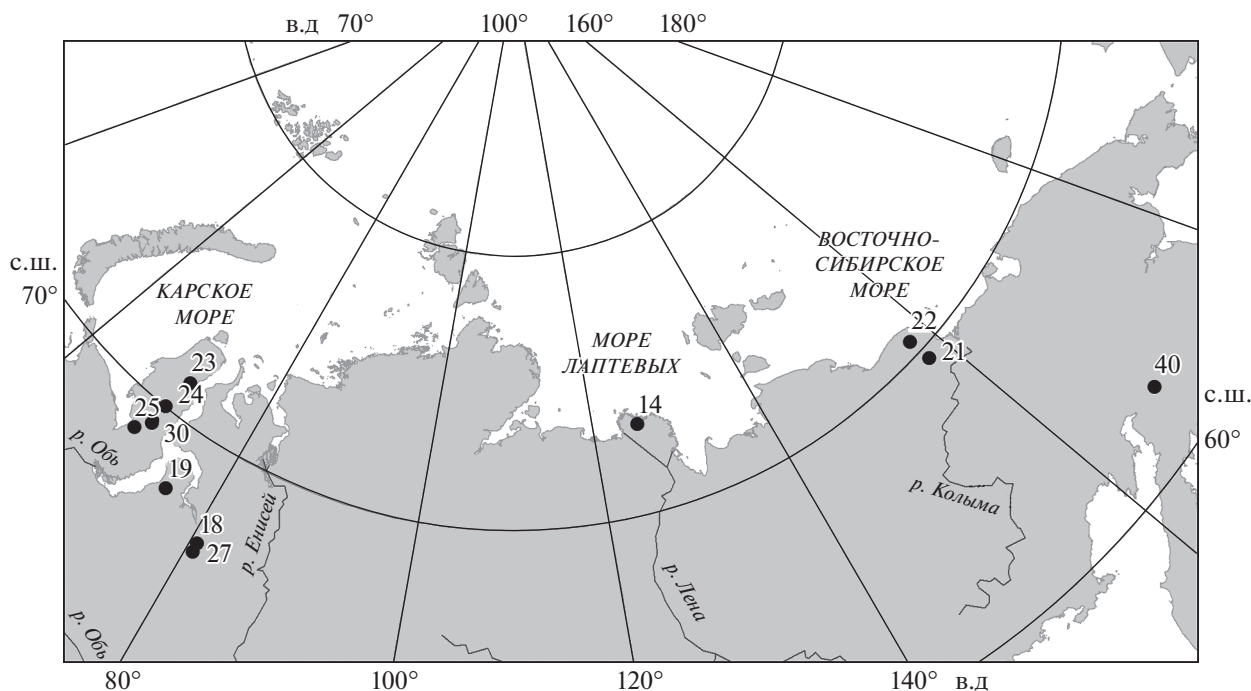


Рис. 3. Схема расположения ключевых участков эрозионно-термокарстовых равнин.

ней площади озера, среднего квадрата площади озера и их отношения, а также средней площади хасырея.

В обработку не включались остаточные озера, сохранившиеся в хасыреях и не до конца в настоящий момент спущенные эрозией. Эти озера на начальном этапе спуска повторяют форму хасырея, имеют совпадающий с ним центр и чуть меньшие размеры, а на позднем этапе отличаются неопределенными очертаниями и размытыми границами. В то же время вторичные термокар-

стовые озера, образовавшиеся внутри хасыреев, учитывались, их отличают, как правило, четкие очертания и несовпадение центра с существующим хасыреем.

Выборки включали от 140 до 535 озер и от 50 до 278 хасыреев

Анализ результатов (табл. 1) показывает, что фактические данные в значительной мере соответствуют теоретически полученной закономерности. Коэффициент корреляции между расчетным и фактическим значением равен 0.94, это го-

Таблица 1. Соответствие расчетной и фактической средней площади хасырея

Участок	Площадь, км <sup>2</sup>	Объем выборки озер	Объем выборки хасыреев	Средняя площадь озера, км <sup>2</sup>	Средний квадрат площади озера, км <sup>4</sup>	Средняя площадь хасырея (расчетная), км <sup>2</sup>	Средняя площадь хасырея (измеренная), км <sup>2</sup>
14	420	209	95	0.356	0.982	2.758	1.489
18	97	140	50	0.031	0.008	0.252	0.446
19	207	161	113	0.049	0.016	0.314	0.456
21	1157	395	206	0.248	0.358	1.446	1.046
22	2867	257	278	0.390	1.333	3.422	3.136
23	123	271	100	0.036	0.007	0.200	0.125
24	153	346	187	0.075	0.036	0.486	0.187
25	202	293	171	0.078	0.023	0.290	0.286
27	158	455	87	0.030	0.003	0.099	0.364
30	441	519	223	0.051	0.016	0.308	0.298
40	670	535	214	0.027	0.005	0.182	0.291

ворит о высокой степени связи, близкой к линейной, что соответствует приведенному выше аналитическому выводу.

### ВЫВОДЫ

1. На однородных участках эрозионно-термокарстовых равнин, находящихся в состоянии динамического равновесия, в подавляющем большинстве случаев существует зависимость количественных характеристик термокарстовых озер и хасыреев – отношение среднего квадрата площади термокарстовых озер к их средней площади равно средней площади хасыреев.

2. Названная зависимость количественных характеристик термокарстовых озер и средней площади хасыреев носит общий характер – справедлива для подобных участков с различными физико-географическими условиями.

3. Равенство на участке отношения среднего квадрата площади термокарстовых озер к их средней площади и средней площади хасыреев, возможно, может выступать критерием наличия состояния динамического равновесия эрозионно-термокарстовой равнины.

### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в рамках гранта РФФИ № 18-17-00226.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *Викторов А.С.* Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука, 2006. 252 с.
3. *Викторов А.С., Орлов Т.В., Трапезникова О.Н., Капралова В.Н., Архипова М.В.* Закономерности распределения площадей озер эрозионно-термокарстовых равнин // Доклады РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 491. № 2. С. 1–4.
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.
6. *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.
7. *Grosse G., Jones B.M., Nitze I., Lindgren P.R., Walter A.K.M., Romanovsky V.E.* Massive Thermokarst Lake Area Loss in Continuous Ice-rich Permafrost of the Northern Seward Peninsula, Northwestern Alaska, 1949–2015 / XI. Int. Conf. on Permafrost. Book of Abstracts. 20–24 June, 2016. Potsdam. Germany. Bibliothek Wissenschaftspark Albert Einstein. 2016. P. 739–740.  
<https://doi.org/10.2312/GFZ.LIS.2016.001>

## RELATION OF QUANTITATIVE CHARACTERISTICS FOR LAKE AND KHASYREI 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 May 13, 2021

The research aims to study a relationship between lake and khasyreis areas within thermokarst plains with fluvial erosion. According to the previously developed model of the landscape morphological patterns, the thermokarst plains with fluvial erosion come to the state of the dynamic balance in case of asynchronous start of the thermokarst with slight climate change and a long period of development; at that the lake area distribution should be the integral exponential one. From this, we can analytically obtain that the ratio of the average squared thermokarst lake area to their average area is equal to the average area of the khasyreis. Eleven key sites for empirical testing are taken in different regions with various permafrost and natural characteristics. The validation of the dependence is carried out using high-resolution satellite imagery. As a result, we found that for homogeneous areas of the thermokarst plains with fluvial erosion in the state of dynamic balance, the dependence of quantitative characteristics for the thermokarst lakes and khasyreis existed in the overwhelming majority of cases and the mentioned dependence is empirically proved.

*Keywords:* khasyreis, thermokarst lake, thermokarst plain with fluvial erosion, mathematical model of the landscape morphological pattern, relationship between lake and khasyreis areas, integral exponential distribution