

## Основные итоги развития математической морфологии ландшафта

А. С. Викторов ✉, Т. В. Гоников, Т. В. Орлов

*Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН, Российская Федерация  
(101000, г. Москва, Уланский пер., 13, стр. 2)*

**Аннотация.** Целью работы было охарактеризовать итоги развития математической морфологии ландшафта за последнее время.

**Материалы и методы.** Основными материалами исследований являлись данные дистанционных съемок высокого разрешения. В качестве базового метода было использовано математическое моделирование, в основе которого лежат подходы теории случайных процессов.

**Результаты и обсуждение.** В итоге был получен широкий комплекс результатов. Так, предпринята разработка новых математических моделей морфологической структуры, прежде всего грядовых аридных ландшафтов. Получены новые закономерности строения и развития морфологических структур, например, взаимосвязей средних площадей озер и площадей хасыреев в пределах эрозионно-термокарстовых равнин. Проведено изучение состояния динамического равновесия в развитии морфологических структур, прежде всего, абразионных берегов с развитием оползневых процессов на примере берегов криолитозоны. Выполнены исследования влияния климатических изменений на развитие морфологических структур. Развиваются методы использования математической морфологии ландшафтов для оценки природных рисков, предпринято изучение изменений количественных оценок природных рисков поражения линейных сооружений в связи с климатическими изменениями на территории криолитозоны.

**Выводы.** Математическая морфология ландшафта остается одной из перспективных ветвей ландшафтоведения, которая позволяет сделать попытку создания некоторых теоретико-математических основ морфологии ландшафта.

**Ключевые слова:** математическая морфология ландшафта, динамическое равновесие морфологических структур ландшафтов, влияние климатических изменений, закономерности развития морфологических структур ландшафтов.

**Для цитирования:** Викторов А. С., Гоников Т. В., Орлов Т. В. Основные итоги развития математической морфологии ландшафта // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2023, № 4, с. 4-14. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2023/4/4-14>

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из интересных и перспективных направлений развития науки о ландшафте в российской географии является направление, получившее название математическая морфология ландшафта. Математической морфологией ландшафта называют направление ландшафтоведения, исследующее количественные закономерности построения мозаик, которые образованы на земной поверхности природно-территориальными комплексами, и методы их математического анализа;

такие мозаики получили название ландшафтных рисунков. Рассматриваемое направление возникло в девяностые годы [1, 2] и развивалось до настоящего времени, расширяя спектр охватываемых задач; в зарубежной географии направление с аналогичным названием появилось только в десятые годы текущего века и по содержанию резко отличается от российского направления, относясь не к науке о ландшафте, а к геоморфологии, также резко отличаясь по подходам к решению задач [13]. Резко отличается по подходам математическая морфоло-

© Викторов А. С., Гоников Т. В., Орлов Т. В., 2023

✉ Викторов Алексей Сергеевич, e-mail: vic\_as@mail.ru

гия ландшафта и от близкого по названию направления в математических науках [20]. Именно методическим подходом – созданием и использованием математических моделей ландшафтных рисунков, базирующихся на теории случайных процессов, отличается рассматриваемое направление также от значительного числа географических работ, использующих количественные характеристики ландшафтных мозаик [6, 9, 12, 14-18, 22 и др.].

Целью настоящей работы является показать последние основные современные результаты, проблемы и перспективы развития математической морфологии ландшафтов.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основным методом математической морфологии ландшафта является математическое моделирование. Именно математические модели ландшафтных рисунков являются ядром математической морфологии ландшафта, с которым связано ее обособление и которое придает целостность рассматриваемому направлению, именно оно является общей основой решения многих разнообразных задач [2, 3]. Особую роль среди математических моделей ландшафтных рисунков играют канонические математические модели ландшафтных рисунков, характеризующие рисунки, сформировавшиеся под действием одного процесса в однородных

условиях; они играют роль «атомов», из которых формируются модели сложных морфологических структур. Модели по сути дела характеризуют ландшафтно-морфологическое строение территории, развившейся под действием некоторого определенного комплекса процессов, то есть обладающей генетической однородностью; конкретные физико-географические условия данной территории (состав отложений, количество осадков, глубина залегания уровня грунтовых вод и др.) влияют только на значения параметров модели.

Создание базы математических моделей морфологических структур по сути дела представляет собой попытку сформировать на математической основе некоторую целостную теорию морфологии ландшафта. Наиболее перспективным подходом для развития математической морфологии ландшафта, как показали исследования, является использование теории случайных процессов. В настоящее время создан некоторый комплекс канонических математических моделей морфологических структур – математические модели территорий с широким развитием карстовых и просадочно-суффозионных процессов, аллювиальных равнин, эрозионных равнин, озерно-термокарстовых равнин, заболоченных и солончаковых равнин, ландшафтов с широким развитием

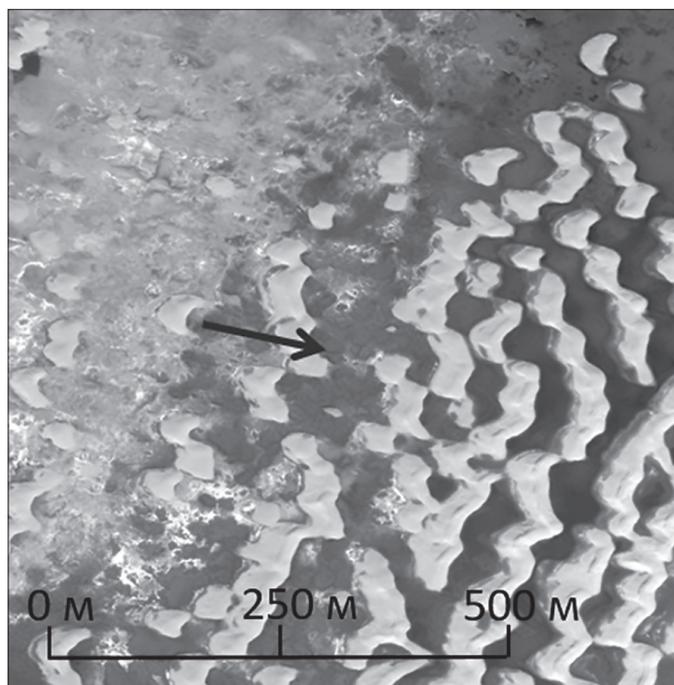


Рис. 1. Типичное изображение морфологической структуры грядовых эоловых ландшафтов, формирующихся на основе барханных цепей, на материалах космической съемки (стрелкой показано направление преобладающих ветров)

[Fig. 1. A typical image of the morphological pattern of eolian ridge landscapes formed by dune chains on satellite imagery (the arrow shows the direction of the prevailing winds)]

оползневых процессов и ряда других. В то же время нельзя сказать, что создание базы моделей завершено, разработка новых математических моделей морфологических структур остается одной из актуальных задач развития математической морфологии ландшафта.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ проведенных исследований показывает, что развитие математической морфологии ландшафта за последнее время связано с пятью главными направлениями.

Одним из наиболее важных остается *разработка новых математических моделей морфологической структуры ландшафтов*. Существенное продвижение за последнее время в рассматриваемом направлении связано с морфологическими структурами аридных ландшафтов. Так была разработана математическая модель морфологической структуры грядовых эоловых ландшафтов, формирующихся на основе барханных цепей [8] (рис. 1).

Анализ процесса формирования названных ландшафтов позволил выделить следующие основные этапы развития этих территорий:

1. Элементарные эоловые формы (барханы) небольших размеров, в процессе движения под воздействием ветра догоняют другие барханы или барханные гряды; при этом происходят присоединения форм с боковых сторон.

2. Происходит постепенное слияние соединившихся эоловых комплексов и перенос песчаного материала вдоль эоловой гряды, что со временем увеличивает ее длину (диаметр) и выравнивает очертания.

Таким образом, основным процессом изменения ландшафта прибрежных зон озерных котловин является слияние барханов в барханные гряды с характерными фестончатыми очертаниями и последующее их переформирование в типичные эоловые гряды с ровными границами.

Для первого этапа развития подобной территории, когда длина барханных гряд еще относительно невелика, может быть предложена модель, описывающая число слившихся барханов в барханной гряде, базирующаяся на следующих допущениях:

- слияния барханов и барханных гряд происходят независимо друг от друга;
- вероятность слияния зависит только от рассматриваемого интервала времени:

Математический анализ модели позволил получить, что распределение числа барханов  $k$ , входящих в барханную грядку, в момент времени  $t$  дается выражением (1):

$$P(k, t) = e^{-\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})^k, \quad k = 1, 2, \dots \quad (1)$$

где:  $\lambda$  – параметр, определяющий вероятность присоединения в единицу времени; таким образом, распределение числа барханов, входящих в барханную грядку, подчиняется в каждый момент времени геометрическому распределению.

На следующем этапе происходят исчезновение фестончатой структуры и сглаживание гряд, при этом продолжается их слияние с другими эоловыми формами – барханами и барханными грядами. На рассматриваемой стадии представляется логичным предположить, что чем больше существующие размеры гряды, тем больше вероятность того, что она при том же временном интервале «поймает» «догоняющий» ее бархан и сольется с ним или с соседними эоловыми комплексами. Модель на этом этапе базируется на следующих допущениях:

- слияние эоловых комплексов (барханов и гряд) происходит независимо друг от друга;
- скорость приращения гряды за счет слияния с барханами, находясь под действием случайных факторов, одновременно прямо пропорциональна ее длине.

Первое допущение представляется естественным в силу независимости поведения отдельных барханов и гряд. Второе допущение определяется, как отмечено выше, тем, что вероятность «поймать» догоняющий бархан зависит от длины гряды, работающей как своеобразная ловушка барханов, поставляющих материал для ее роста.

Анализ модели позволил получить, что длина гряды в момент  $t$  подчиняется логнормальному распределению с функцией плотности распределения (2):

$$f_{\zeta}^{\prime}(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma x}\sqrt{t}} e^{-\frac{(\ln x - at)^2}{2\sigma^2 t}} \quad (2)$$

где:  $a, \sigma$  – параметры изменения грядово-эолового ландшафта во времени. Эмпирическая проверка моделей выполнялась на основе участков грядовых эоловых ландшафтов в котловине озера Кукнор, на территории национального парка Ленсойс-Мараньенсес (Бразилия) и дала положительные результаты [8].

Выполнены исследования по развитию нового варианта математической модели ландшафтного рисунка эрозионно-термокарстовых равнин, относящейся к сложным морфологическим структурам [5]. Ранее предложенная модель морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин име-

ла определенные недостатки. Эти недостатки были связаны прежде всего с предположением об одинаковом ходе процессов возникновения, роста и спуска термокарстовых озер, возникших на основной поверхности, и озер, возникших на поверхности хасыреев. Разработан новый вариант модели, учитывающий разный ход (возникновение и рост) термокарстовых процессов на водораздельной поверхности и пониженной поверхности хасыреев. Данная модель была эмпирически проверена и подтверждена на восьми выбранных ключевых участках, которые расположены в различных физико-географических, климатических и геокриологических условиях. Разработанный вариант модели подтверждается математическим анализом распределений площадей озер в пределах водораздельной поверхности и пониженной поверхности хасыреев и показывает и в новом варианте модели существование динамического равновесия в возникновении, росте и спуске термокарстовых озер.

Анализ модели также показывает, что морфологическая структура эрозионно-термокарстовых равнин эволюционно меняется, сокращая площадь основной водораздельной поверхности по зависимости, близкой к экспоненте; конкретный вид зависимости зависит прежде всего от отношения плотности генерации озер и плотности расположения истоков эрозионных форм.

Существенно новой также является математическая модель морфологического строения абразионных берегов криолитозоны с развитием оползневых процессов, охарактеризованная ниже.

Выполненные исследования позволили осуществить продвижение в направлении выявления *новых закономерностей строения и развития морфологических структур*. Так, исследование морфологической структуры грядовых ландшафтов котловин аридных озер, прежде всего, с развитием бэровских бугров, позволило выявить две закономерности [7].

– логнормальный характер распределения длин гряд и

– пуассоновское распределение особых точек гряд (начало, конец, точки примыкания).

Эти закономерности статистически подтверждены на шести участках на территории Северного Прикаспия и двух участках грядовых равнин в котловине озера Чад и, таким образом, выполняются в разных физико-географических условиях.

Другим примером новых выявленных закономерностей явились результаты изучения взаимосвязей количественных характеристик площадей

озер и площадей хасыреев в пределах эрозионно-термокарстовых равнин [21]. 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 ( $M_l^2$ ) к их средней площади ( $S_l$ ) равно средней площади хасыреев ( $S_h$ ) (3):

$$S_h = \frac{M_l^2}{S_l} \quad (3)$$

Для экспериментального исследования были выбраны 11 ключевых участков в различных регионах разнообразных в геокриологическом и физико-географическом отношении, на которых на базе космических снимков высокого разрешения была проведена проверка обоснованной зависимости, результаты которой оказались положительными.

Еще одним из примеров выявленных закономерностей явились результаты анализа пространственной организации грядово-мочажинных комплексов верховых олиготрофных болот и комплексов аапа [11]. В рамках данного подхода грядово-мочажинная структура представляется как ансамбль элементарных и изогнутых частей пересекающихся гряд. Элементарные секции гряд разделены мочажинами со сфагновым или открытым торфяным покровом. Пересечения гряд рассматриваются как особые точки, описывающие рисунок. Результаты были протестированы на ряде участков Архангельской области и Ханты-Мансийского АО.

Было показано, что площадь мочажин грядово-мочажинных комплексов имеет логнормальное распределение, для аапа комплексов такого явления не наблюдается. Пересечения гряд расположены в соответствии с распределением Пуассона как для грядово-мочажинных, так и аапа комплексов.

Особым направлением исследований математической морфологии ландшафта в рассматриваемом периоде явилось *изучение состояния динамического равновесия в развитии морфологических структур*. Здесь одним из наиболее интересных результатов явилось исследование морфологических особенностей абразионных берегов с развитием оползневых процессов; оно было выполнено на примере берегов криолитозоны [4].

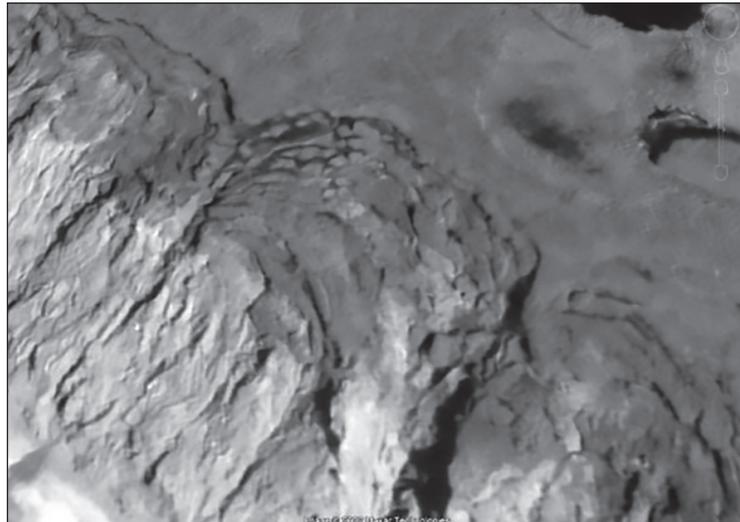


Рис. 2. Типичное изображение абразионных берегов криолитозоны с развитием оползневых процессов на материалах космической съемки  
 [Fig. 2. A typical image of abrasion shores under the landslide process developing in the cryolithozone on space imagery]

Характерной особенностью термоцирков являются дуги, ограничивающие оползневое тело и являющиеся одновременно границей термоцирка с водораздельной поверхностью. При развитии оползания на склоне происходят следующие основные процессы:

- Формирование нового оползневого тела и соответствующей дуги и хорды,
- Стирание частей уже существующих термоцирков с коррекцией соответствующих дуг и хорд,
- Исчезновение термоцирка (и оползневого тела) и соответственно его дуги и хорды в случае полного стирания существующего оползня новым оползневым телом.

Таким образом, идет постоянное обновление набора термоцирков и, соответственно, ограничивающих их дуг.

В основу решения задачи о динамических особенностях территории была положена модель, базирующаяся на следующих допущениях:

- вероятность появления новой дуги за время  $\Delta t$  с центральной точкой на отрезке береговой линии  $\Delta l$  определяется только величиной временного интервала и отрезка,
- длины хорд дуг возникающих оползней имеют постоянное распределение  $F_0(x)$ .

Математический анализ допущений позволил получить вывод, что в условиях относительного однородного по геологическим и геокриологическим условиям прямолинейного абразионного склона при значительном времени развития устанавливается динамическое равновесие, которое

проявляется в стабилизации во времени вероятностного распределения размеров термоцирков по простиранию склона и в стабилизации средней плотности расположения термоцирков вдоль береговой линии. При этом обоснована аналитическая зависимость между вероятностным распределением размеров хорд образующихся молодых термоцирков (оползней) и наблюдающимся на береговой линии вероятностным распределением размеров хорд всех представленных термоцирков (оползней), в том числе, частично стертых более поздними оползнями (4):

$$f_\tau(x) = \frac{f_0(y) + \varepsilon \frac{[1 - F_0(y)]}{M\xi_0}}{1 + \varepsilon} \quad (4)$$

где:  $\varepsilon = \frac{4(M\xi_0^\zeta)^2}{M^2\xi_0^\zeta}$ ,  $F_0(x)$ ,  $f_0(x)$  – распределение и плотность распределения длин хорды дуг возникающих оползней,  $M\xi_0^\zeta$ ,  $M^2\xi_0^\zeta$  – среднее и момент второго порядка этого распределения. Также получено выражение для средней линейной плотности расположения термоцирков и ее взаимосвязи с параметрами распределения размеров хорд возникающих термоцирков (5):

$$y(\infty) = \frac{2}{M\xi_0^\zeta} [1 + \varepsilon] \quad (5)$$

Кроме аналитического было выполнено эмпирическое исследование на пяти однородных по условиям прямолинейных участках берегов (полуостров Канин Нос и Ямал). Оно показало, что

между морфологическими особенностями различных участков абразионных берегов криолитозоны с развитием оползневых процессов существует определенная общность – на большинстве участков, внутренне однородных по условиям и морфологическим особенностям, но находящихся в различных физико-географических и инженерно-геокриологических условиях, распределение размеров хорд дуг, стрелок дуг и радиусов кривизны, а также центральных углов отвечает логнормальному распределению. Ориентировка хорд по отношению к общему простираанию участка подчиняется нормальному распределению. В настоящее время логнормальность распределения хорд и дуг подтвердилась еще на семи участках (остров Колгуев, Гыданский полуостров, Хайпудырская губа). Значения параметров распределений исследованных количественных характеристик морфологических особенностей оползней зависят от физико-географических и инженерно-геокриологических условий конкретных участков.

Особым направлением исследований в рамках математической морфологии ландшафта явилось *исследование влияния климатических изменений на развитие морфологической структуры ландшафтов*. Был проведен широкий комплекс исследований по оценке влияния климатических изменений на наиболее распространенные ландшафты – озерно-термокарстовые равнины, эрозионно-термокарстовые равнины и аллювиальные равнины [19]. Методика исследования изменения морфологической структуры изучаемых ландшафтов включала следующие основные этапы:

– выбор параметров для сравнения морфологической структуры изучаемых ландшафтов в различное время на основе соответствующей модели;

– выбор эталонных участков по данным дистанционного зондирования, литературным и иным источникам и выделение исследуемых наиболее мобильных элементов морфологической структуры исследуемых ландшафтов в пределах ключевых участков;

– сравнение эмпирических распределений параметров морфологических структур ландшафта за два срока для каждого участка на основе статистического критерия Смирнова с анализом выявленных тенденций.

Исследования проведены на 8, 9 и 11 участках для озерно-термокарстовых, эрозионно-термокарстовых и аллювиальных равнин соответственно. Для данного исследования выбраны участки, расположенные на севере Восточно-Европейской рав-

нины, на Западно-Сибирской низменности, в Восточной Сибири, на Камчатке, на Аляске.

Анализ результатов заставляет сделать вывод, что изменение морфологических структур анализируемых ландшафтов не является значительным.

Так, анализ результатов обработки приводит к выводу, что изменение распределений площадей термокарстовых озер эрозионно-термокарстовых равнин, носит ограниченный характер. Проверка статистических различий между выборками 1961-1979 годов и 2011-2019 годов для каждого ключевого участка эрозионно-термокарстовых равнин по критерию Смирнова не выявила статистически значимые различия в распределениях площадей озер в 7 случаях из 9, и различия наблюдаются только на двух участках.

Морфологическая структура озерно-термокарстовых равнин также не демонстрирует в настоящее время реальной трансформации несмотря на происходящие климатические изменения. Так, оценка значимости статистических различий между двумя выборками площадей термокарстовых озер за 1965-1976 и 2008-2014 годы по критерию Смирнова для каждого участка выявила статистически значимое различие только для одного участка.

В морфологической структуре ландшафтов речных пойм анализировались стрелы уже сформировавшихся и молодых (формирующихся) пойменных сегментов. Проверка различий между двумя выборками за 1964-1980 и 2011-2019 годы для каждого ключевого участка не выявила статистически значимых различий как в характеристиках всех сегментов, так и в характеристиках формирующихся сегментов для всех 11 участков. Это заставляет предположить, что на настоящий момент влияние климатических изменений на русловые процессы не настолько существенно, чтобы поменять параметры распределения так сильно, чтобы речь шла уже о двух выборках, принадлежащих к различным распределениям. Однако современные температурные тренды значимо коррелируют с изменением параметров модели.

Особым направлением исследований в рамках математической морфологии ландшафта явилось *использование математической морфологии ландшафтов для оценки природных рисков*. В ряде выполненных исследований было показано, что использование подходов математической морфологии ландшафтов позволяет подойти к решению задачи количественной оценки вероятности поражения инженерного сооружения опасным процессом за заданный временной интервал. По-

добные исследования были выполнены для задач поражения термокарстовыми, просадочно-суффозионными и карстовыми процессами [3], при этом особое внимание было уделено линейным сооружениям.

В результате исследований были получены и проверены выражения, связывающие количественные параметры морфологических структур, например, озерно-термокарстовых равнин и веро-

ятность поражения за заданное время инженерного сооружения заданных размеров.

Новым шагом в этом направлении явился переход к антропогенно-инициированным процессам. Так, было предпринято исследование по оценке вероятности поражения линейного сооружения инициированными термокарстовыми процессами, возникшими в процессе строительства и эксплуатации сооружения (рис. 3).

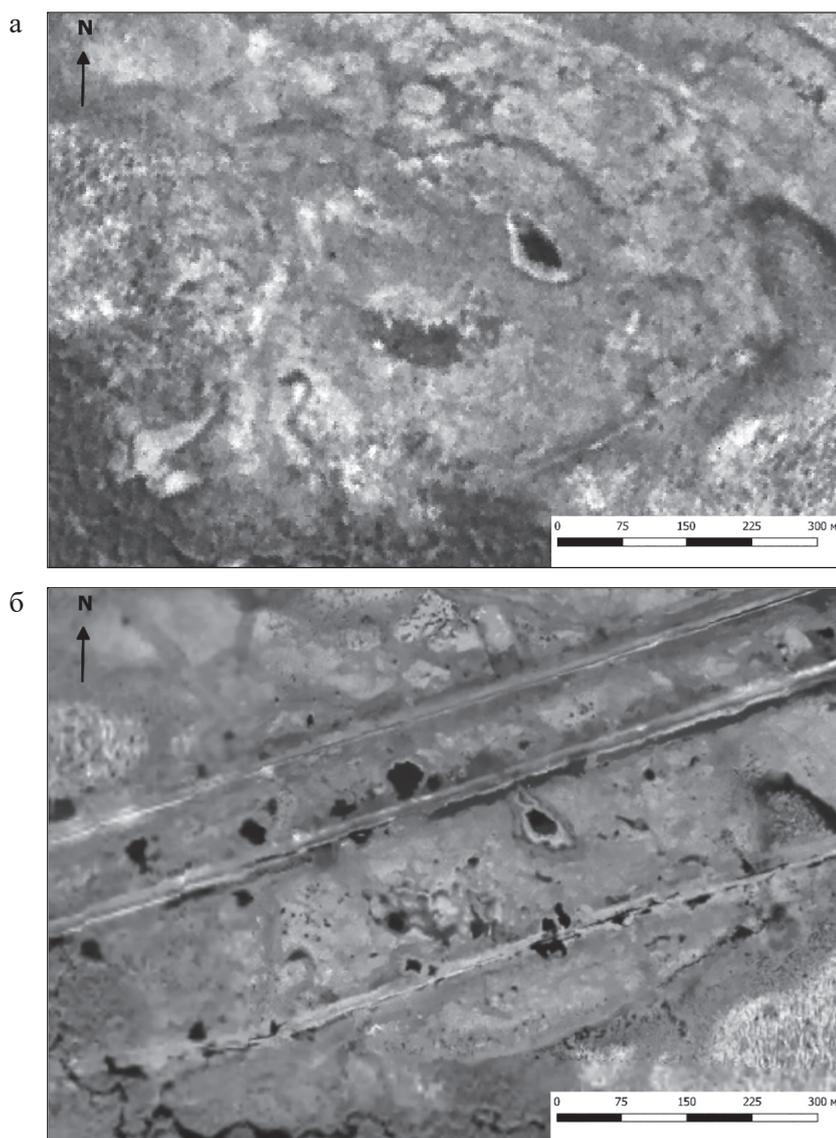


Рис. 3. Пример развития инициированного термокарста в зоне линейного сооружения и его отражения на материалах космической съемки, Надымский участок (а – 1969 год, б – 2012 год)

[Fig. 3. An example of provoked thermokarst in the proximity of linear structure and its image on space imagery. A Nadym site (a – 1989, b – 2012)]

Основные сложности решения данной задачи были связаны со следующими факторами:

- Изменение плотности генерации термокарстовых понижений в зависимости от расстояния от линейного сооружения,
- Отличие формы понижений от круговой.

С учетом особенностей развития инициированного термокарста в основу была положена модель базирующаяся на следующих допущениях [10]:

- Возникновение термокарстовых понижений происходит в ограниченной полосе (ширина а), прилегающей к линейному сооружению; возник-

новение термокарстовых понижений происходит независимо друг от друга и вероятность возникновения на данной площадке определяется только величиной площадки ( $\Delta s$ ) и ее удаленностью от линейного сооружения ( $r$ )

$p(r, \Delta s) = \lambda(r) \Delta s + o(\Delta s)$ , где  $\lambda(r)$  – коэффициент.

- Очаг инициированного термокарста в зоне линейного сооружения можно приблизительно рассматривать как эллипс с соотношением длин полуосей, которое имеет постоянное вероятностное распределение и независимо меняется год от года,

- Рост линейных размеров термокарстовых понижений (полуосей эллипса) благодаря термоабразионному воздействию<sup>1</sup> происходит независимо от других понижений, и он прямо пропорционален плотности тепловых потерь через боковую поверхность понижения, залитую водой.

Таким образом, рассматривался вариант синхронного старта, когда процесс появления первичных понижений происходит за короткий промежуток времени после начала строительства линейного сооружения.

Анализ допущений показал, что для исследуемых территорий должны быть справедливы следующие закономерности:

- распределение расстояний между центрами термокарстовых понижений вдоль линейного сооружения должно при условии справедливости модели отвечать экспоненциальному распределению,

- длины проекций термокарстовых понижений на направление линейного сооружения и направление, перпендикулярное к нему должны подчиняться логнормальному распределению, в общем случае с разным значением параметров.

Эмпирические проверки велись по участкам Амга 1, Амга 3, Диринг, Южно-Якутский участки (ВСТО -1, ВСТО -2). На основе модели была аналитически решена задача оценки вероятности поражения линейного сооружения инициированными термокарстовыми процессами.

Были также проведены исследования изменений количественных оценок природных рисков поражения линейных сооружений в связи с климатическими изменениями; они были выполнены на основе анализа процессов в пределах эрозионно-термокарстовых равнин. Исследования проводилась на четырех тестовых участках общей площадью 6442 кв.км (Колымская и Яно-Инди-гирская низменности, Ямал, Чукотка), располо-

женных в разных физико-географических условиях, для модельных линейных сооружений для двух сроков.

Формирование массива модельных линейных инженерных сооружений в пределах каждого участка выполнялось в среде ARCGIS с использованием датчика случайных чисел. Для каждой пары сроков съемки моделировалась ситуация создания линейного сооружения в первый срок и подсчета частоты поражения ко второму сроку. Для этого случайным образом (с использованием датчика случайных чисел) на космические снимки высокого разрешения срока 1 набрасывался массив фрагментов линейных сооружений фиксированной длины и параллельного направления; из них отбраковывались сооружения, пересекавшие активные очаги (таким образом моделировалось создание линейных сооружений, обходящих существующие термокарстовые очаги). Получившийся откорректированный массив сравнивался с изображением срока 2 и подсчитывалась частота поражения. Процедура повторялась для разных длин модельных сооружений для двух временных интервалов. На последнем этапе для каждого участка сравнивались с помощью критерия Пирсона частоты поражения линейных инженерных сооружений для разных временных интервалов.

В итоге проведенного анализа выявлено, что по количественным экспериментальным данным, на базе модельных линейных сооружений, наблюдается дифференцированное по участкам изменение риска поражений линейных сооружений в пределах эрозионно-термокарстовых равнин за последние несколько десятков лет (46-56 лет). На значительной части участков развития эрозионно-термокарстовых равнин (три из четырех), риски изменились статистически незначительно, несмотря на идущие климатические изменения. В то же время, на отдельных участках эрозионно-термокарстовых равнин, вероятность поражения линейных сооружений демонстрирует многократное статистически значимое увеличение (в 6-9 раз для модельных сооружений рассмотренных длин).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ современного состояния математической морфологии ландшафта позволяет сделать следующие выводы.

Математическая морфология ландшафта остается одной из перспективных ветвей ландшафтоведения, которая позволяет сделать попытку

<sup>1</sup> Возможна и низкая интенсивность термоабразии, при этом процесс приближается к «чисто термокарстовому».

создания некоторых теоретико-математических основ морфологии ландшафта.

Наиболее развивающимися в настоящее время направлениями математической морфологии ландшафта являются

- разработка новых математических моделей морфологической структуры ландшафтов,
- выявление новых закономерностей строения и развития морфологических структур,
- изучение состояния динамического равновесия в развитии морфологических структур,
- исследование влияния климатических изменений на развитие морфологической структуры ландшафтов,
- использование математической морфологии ландшафтов для оценки природных рисков.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Викторов А.С. Математические модели ландшафтных рисунков // *Известия ВГО*, 1992, т. 124, вып. 1, с. 75-83.
2. Викторов А.С. *Математическая морфология ландшафта*. Москва: Тратек, 1998. 220 с.
3. Викторов А.С. *Основные проблемы математической морфологии ландшафта*. Москва: Наука, 2006. 252 с.
4. Викторов А.С. Моделирование морфологических особенностей абразионных берегов с развитием оползневых процессов в криолитозоне // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*, 2022, № 6, с. 28-37.
5. Викторов А.С., Капралова В.Н. Орлов Т.В. Развитие модели морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин на основе использования материалов космической съемки // *Исследование Земли из космоса*, 2023, № 3, с. 1-12
6. Геренчук К.И., Топичев А.Г. *Информационный анализ структуры природных комплексов* // *Известия АН СССР. Серия географическая*, 1970, № 6, с. 132-141.
7. Гоников Т.В. Сравнительный количественный анализ морфологического строения грядовых аридных ландшафтов озерных котловин применительно к решению геоэкологических задач // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*, 2021, № 6, с. 28-36.
8. Гоников Т.В., Викторов А.С. Модель морфологической структуры грядовых эоловых ландшафтов, сформировавшихся на основе барханных цепей // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*, 2020, № 5, с. 32-39.
9. Ивашутина Л.И., Николаев В.А. Изучение контрастности ландшафтных сопряжений в целях обоснования физико-географического районирования // *Ландшафтоведение*, 1972, с. 59-73.

10. Модель развития инициированных термокарстовых процессов в зоне линейных сооружений (на основе подходов математической морфологии ландшафта) / А.С. Викторов, Т.В. Орлов, В.Н. Капралова и др. // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*, 2018, № 5, с. 87-96.

11. Параметризация вероятностной модели грядово-мочажинных структур на верховых болотах (на примере болотных массивов Беломоро-Кулойского плато) / Т.В. Орлов, С.А. Садков, М.В. Архипова и др. // *Болота Северной Европы: разнообразие, динамика и рациональное использование*, 2015, с. 61-62.

12. A Factor Analysis of Landscape Pattern and Structure Metrics / Ritters K. H., O'Neill R. V., Hunsaker C. T. a. o. // *Landscape Ecology*, 1995, vol. 10, no. 1, pp. 23-39.

13. Daya Sagar B. S. *Mathematical Morphology in Geomorphology and GISci*. CRC Press, Boca Raton, FL, 2013. 546 p.

14. Forman, R.T.T. *Land Mosaics. The ecology of landscapes and regions*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 632 p.

15. Jaeger J.A.G. Landscape division, splitting index, and effective mesh size; new measures of landscape fragmentation // *Landscape Ecology*, 2000, vol. 15, no. 2, pp. 115-130.

16. McGarigal K., Marks B.J. *Fragstats. Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. Version 2.0*. Corvallis: Forest Science Department, Oregon State University, 1994. 122 p.

17. *Measuring landscapes: a planner's handbook* / Leitao A.B. et al. Island press, 2006. 245 p.

18. Modification of the effective mesh size for measuring landscape fragmentation to solve the boundary problem / Moser B., Jaeger J.A.G., Tapeiner U. et al. // *Landscape Ecology*, 2007, vol. 22, no. 3, pp. 447-459.

19. Research into Cryolithozone Spatial Pattern Changes Based on the Mathematical Morphology of Landscapes / Victorov A. S., Kapralova V.N, Orlov T. V. et al. // *Energies*, 2022, vol. 15, no. 3, pp. 1218.

20. Serra J. *Image analysis and mathematical morphology*. London: Academic Press, 1982. 610 p.

21. Victorov A. S., Orlov T. V., Trapeznikova O. N. Relationships between Quantitative Parameters of Lake Areas and Khasyrei Areas on Thermokarst Plains with Fluvial Erosion // *Doklady Earth Sciences*, 2021, vol. 500, part 2, pp. 866-869.

22. With A.K. *Essentials of Landscape Ecology*. Oxford: University Press, 2019. 641 p.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию: 20.07.2023

Принята к публикации: 28.11.2023

## Main Results of the Development of the Mathematical Landscape Morphology

A. S. Victorov✉, T. V. Gonikov, T. V. Orlov

*Sergeev Institute of Environmental Geoscience of the RAS, Russian Federation  
(13, bild. 2, Ulansky lane, Moscow, 101000)*

**Abstract:** The purpose of the article was to characterise the recent development of mathematical landscape morphology.

**Materials and methods.** The main research materials were high-resolution remote sensing data. Mathematical modelling based on the approaches of the theory of random processes was used as a basic method. **Results and Discussion.** As a result, a wide range of results was obtained. Thus, the development of new mathematical models of morphological pattern, primarily of ridge arid landscapes, was undertaken. New regularities of the structure and development of morphological structures were obtained, for example, interrelations of average areas of lakes and areas of khasyreys (drained lakes) within erosion-thermokarst plains. The state of dynamic equilibrium in the development of morphological patterns, primarily abrasion banks with the development of landslide processes on the example of cryolithozone banks was investigated. The influence of climatic changes on the development of morphological patterns was carried out. The methods of using mathematical morphology of landscapes for the assessment of natural risks are developed. The changes in quantitative assessments of natural risks of damage to linear structures in connection with climatic changes in the cryolithozone area are studied.

**Conclusions.** Mathematical morphology of landscape remains one of the promising branches of landscape science, which allows us to make an attempt to create some theoretical and mathematical foundations of landscape morphology.

**Key words:** mathematical morphology of landscape, dynamic equilibrium of morphological patterns of landscapes, influence of climatic changes, regularities of development of morphological patterns of landscapes.

**For citation:** Victorov A. S., Gonikov T. V., Orlov T. V. Main Results of the Development of the Mathematical Landscape Morphology. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografiya. Geoekologiya*, 2023, no. 4, pp. 4-14 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2023/4/4-14>

### REFERENCES

1. Victorov A.S. Matematicheskiye modeli landshaftnykh risunkov [Mathematical models of landscape patterns]. *Izvestiya VGO*, vol. 124, v. 1, pp. 75-83. (In Russ.)
2. Victorov A. S. *Matematicheskaya morfologiya landshafta* [Mathematical Morphology of Landscapes]. Moscow: Tratek, 1998. 220 p. (In Russ.)
3. Victorov A. S. *Osnovnyye problemy matematicheskoy morfologii landshafta* [General problems of the mathematical morphology of landscapes]. Moscow: Nauka, 2006. 252 p. (In Russ.)
4. Victorov A. S. Modelirovaniye morfologicheskikh osobennostey abraziionnykh beregov s razvitiyem opolznevnykh protsessov v kriolitozone [Modeling of morphological features of abrasion coasts under the development of landslide processes in the Cryolithozone]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Hidrogeologiya. Geokriologiya*, 2022, no. 6, pp. 28-37. (In Russ.)
5. Victorov A. S., Kapralova V.N. Orlov T.V. Razvitiye modeli morfologicheskoy struktury erozionno-thermokarstovykh ravnin na osnove ispol'zovaniya materialov kosmicheskoy s"yemki. [Development of a model of the morphological structure of erosion-thermokarst plains based on the use of satellite imagery materials]. *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*, 2023, no. 3, pp.1-12. (In Russ.)

© Victorov A. S., Gonikov T. V., Orlov T. V., 2023

✉ Alexey S. Viktorov, e-mail: vic\_as@mail.ru



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

6. Gerenchuk K.I., Topichev A.G. Informatsionnyy analiz struktury prirodnykh kompleksov. [Information analysis of the patterns of natural units]. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geograficheskaya*, 1970, no. 6, pp. 132-141. (In Russ.)
7. Gonikov T.V. Sravnitel'nyy kolichestvennyy analiz morfologicheskogo stroyeniya gryadovykh aridnykh landshaftov ozernykh kotlovin primenitel'no k resheniyu geokologicheskikh zadach [Comparative quantitative analysis of the morphological pattern of ridge arid landscapes of lake basins in relation to the solution of environmental problems]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*, 2021, no. 6, pp. 28-36. (In Russ.)
8. Gonikov T.V., Victorov A.S. Model' morfologicheskoy struktury gryadovykh eolovykh landshaftov, sformirovavshikhsya na osnove barkhannykh tsepey [Model of the morphological pattern of eolian ridge landscapes formed on the basis of dune chains]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*, 2020, no. 5, pp. 32-39. (In Russ.)
9. Ivashutina L.I., Nikolayev V.A. Izucheniye kontrastnosti landshaftnykh sopryazheniy v tselyakh obosnovaniya fiziko-geograficheskogo rayonirovaniya. [The study of the contrast of landscape pairings in order to substantiate the physical-geographical zoning]. *Landshaftovedeniye*, 1972, pp. 59-73. (In Russ.)
10. Model' razvitiya initsirovannykh termokarstovykh protsessov v zone lineynykh sooruzheniy (na osnove podkhodov matematicheskoy morfologii landshafta) [Model of the development of initiated thermokarst processes in the zone of linear structures (based on the approaches of the mathematical morphology of landscapes)] / A.S. Victorov, T.V. Orlov, V.N. Kapralova, A.L. Dorozhko *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*, 2018, no. 5, pp. 87-96. (In Russ.)
11. Parametrizatsiya veroyatnostnoy modeli gryadovo-mochazhinnykh struktur na verkhovykh bolotakh (na primere bolotnykh massivov Belomoro-Kuloyskogo plato) [Parameterization of a probabilistic model of ridge-hollow structures in raised bogs (on the example of bog massifs of the Belomoro-Kuloi Plateau)] / T.V. Orlov, S.A. Sadkov, M.V. Arkhipova et al. *Bolota Severnoy Yevropy: raznoobraziye, dinamika i ratsional'noye ispol'zovaniye*, 2015, pp. 61-62. (In Russ.)
12. A factor of landscape pattern and structure metrics / Ritters K.H., O'Neill R.V., Hunsaker C.T. a. o. *Landscape Ecology*, 1995, vol. 10, no. 1, pp. 23-39.
13. Daya Sagar B.S. *Mathematical Morphology in Geomorphology and GISci*. CRC Press, Boca Raton, FL, 2013. 546 p.
14. Forman R.T.T. *Land Mosaics. The ecology of landscapes and regions*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 632 p.
15. Jaeger J.A.G. Landscape division, splitting index, and effective mesh size; new measures of landscape fragmentation. *Landscape Ecology*, 2000, vol. 15, no. 2, pp. 115-130.
16. McGarigal K., Marks B.J. *Fragstats. Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. Version 2.0*. Corvallis: Forest Science Department, Oregon State University, 1994. 122 p.
17. *Measuring landscapes: a planner's handbook* / Leitao A.B. et al. Island press, 2006. 245 p.
18. Modification of the effective mesh size for measuring landscape fragmentation to solve the boundary problem / Moser B., Jaeger J.A.G., Tappeiner U. et al. *Landscape Ecology*, 2007, vol. 22, no. 3, pp. 447-459.
19. Research into Cryolithozone Spatial Pattern Changes Based on the Mathematical Morphology of Landscapes / Victorov A.S., Kapralova V.N., Orlov T.V. et al. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 3, pp. 1218.
20. Serra J. *Image analysis and mathematical morphology*. London: Academic Press, 1982. 610 p.
21. Victorov A.S., Orlov T.V., Trapeznikova O.N. Relationships between Quantitative Parameters of Lake Areas and Khasyrei Areas on Thermokarst Plains with Fluvial Erosion. *Doklady Earth Sciences*, 2021, vol. 500, part 2, pp. 866-869.
22. With A.K. *Essentials of Landscape Ecology*. Oxford: University Press, 2019. 641 p.

**Conflict of interests:** The authors declare no information of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Received: 20.07.2023

Accepted: 28.11.2023

Викторов Алексей Сергеевич  
главный научный сотрудник Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Москва, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-4221-2293, e-mail: vic\_as@mail.ru

Гоников Тимур Валериевич  
младший научный сотрудник Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Москва, Российская Федерация, ORCID: 0000-0001-8725-166X, e-mail: gonikov.timur@yandex.ru

Орлов Тимофей Владимирович  
ведущий научный сотрудник Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Москва, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-0708-2574, e-mail: tim.orlov@gmail.com

Alexey S. Viktorov  
Chief Scientific Officer at the Sergeev Institute of Environmental Geoscience of the RAS, Moscow, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-4793-4607, e-mail: vic\_as@mail.ru

Timur V. Gonikov  
Junior researcher at the Sergeev Institute of Environmental Geoscience of the RAS, Moscow, Russian Federation, ORCID: 0000-0001-8725-166X, e-mail: gonikov.timur@yandex.ru

Timofey V. Orlov  
Leading Researcher at the Sergeev Institute of Environmental Geoscience of the RAS, Moscow, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-0708-2574, e-mail: tim.orlov@gmail.com