

DOI:10.17308/978-5-9273-3692-0-2023-18-21

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗВИТИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОРФОЛОГИИ ЛАНДШАФТА

THE MAIN RESULTS OF THE DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL LANDSCAPE MORPHOLOGY

Викторов А.С.

Victorov A.S.

e-mail: vic_as@mail.ru

Институт геоэкологии им. Е.М.Серегеева РАН, Москва, Россия
Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS, Moscow, Russia

Аннотация. Основные результаты развития математической морфологии ландшафта за последнее время связаны с пятью главными направлениями. 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 озера 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.

Abstract. The main results of developing the mathematical morphology of landscapes deal with five general branches. So, new mathematical models of the morphological patterns, such as for arid ridge landscapes, are developed. New laws are found concerning the morphological pattern structure and development, including interrelations between the average lake area and the khasyrei area for thermokarst plains with fluvial erosion. The state of a dynamic balance as a stage of morphological pattern development was studied for the cryolithozone abrasion shores with landslides in particular. The influence of climatic changes on morphological pattern development is also investigated.

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

Keywords: Mathematical morphology of landscapes, dynamic balance of landscape morphological patterns, influence of climatic changes, laws of the morphological pattern development.

Основные результаты развития математической морфологии ландшафта за последнее время связаны с пятью главными направлениями.

Разработка новых математических моделей морфологической структуры ландшафтов. Наиболее существенное продвижение здесь связано с морфологическими структурами аридных ландшафтов. Так разработана математическая модель морфологической структуры грядовых эоловых ландшафтов, формирующихся на основе барханных цепей [3].

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

слияния барханов и барханных гряд происходят независимо друг от друга;

вероятность слияния зависит только от рассматриваемого интервала времени Δt ;

Математический анализ модели позволил получить, что распределение числа барханов k , входящих в барханную гряду, в момент времени t дается выражением:

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

где λ – параметр, то есть, подчиняется геометрическому распределению.

На следующем этапе происходят исчезновение фестончатой структуры и сглаживание гряд, при этом продолжается их слияние с другими эоловыми формами – барханами и 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" догнавший 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 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, что длина гряды в момент t подчиняется логнормальному распределению с функцией плотности распределения:

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

где a, σ — параметры изменения грядово-эолового ландшафта во времени. Эмпирическая проверка

моделей выполнялась на основе участков грядовых эоловых ландшафтов в котловине оз. Кукнор, в котловине оз. Чад и побережья.

Также существенно новой является математическая модель морфологического строения абразионных берегов криолитозоны с развитием оползневых процессов.

Выполненные исследования позволили получить *новые закономерности строения и развития морфологических структур*. Так, исследование морфологической структуры грядовых ландшафтов котловин аридных озер, прежде всего, с развитием бэровских бугров, позволило выявить две закономерности [3].

- логнормальный характер распределения длин гряд и
- пуассоновское распределение особых точек гряд (начало, конец, точки примыкания).

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

Другим примером новых закономерностей явились результаты изучения взаимосвязей количественных характеристик площадей озер и площадей хасыреев в пределах эрозионно-термокарстовых равнин [4]. 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)

$$s_h = \frac{M_l^2}{s_l}.$$

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, которая оказалась положительной.

Особым направлением исследований 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 [1].

Абразионные берега с развитием оползневых процессов представляют собой сочетание термоцирков разного возраста с развитием оползневых, обвально-осыпных, термоабразионных и термоденудационных процессов.

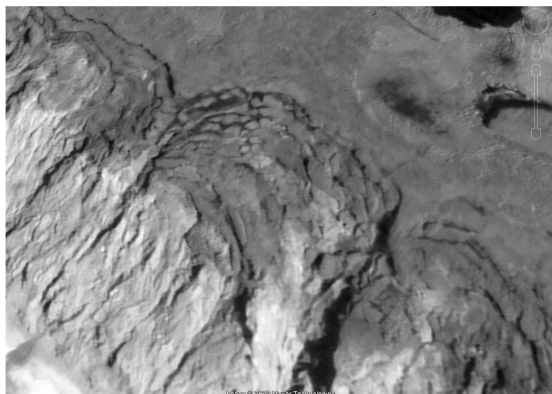


Рис. 1. Типичное изображение абразионных берегов криолитозоны с развитием оползневых процессов на материалах космической съемки.

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:

1) вероятность появления новой дуги за время Δt с центральной точкой на отрезке береговой линии Δl определяется только величиной временного интервала и отрезка

2) хорды 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 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 хорд всех представленных термоцирков (оползней), в том числе частично стертых более поздними оползнями,

$$f_\tau(x) = \frac{f_0(y) + \varepsilon \frac{[1 - F_0(y)]}{M\xi_0}}{1 + \varepsilon}, \text{ где } \varepsilon = \frac{4(M\xi_0)^2}{M^2\xi_0}$$

$F_0(x)$, $f_0(x)$ - распределение и плотность распределения длин хорды дуг возникающих оползней, $M\xi_0$, $M^2\xi_0$ - 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

$$\gamma(\infty) = \frac{2}{M\xi_0} [1 + \varepsilon].$$

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 простиранию участка подчиняется нормальному распределению. 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 было 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 [5]. Методика изучения изменения морфологической структуры изучаемых ландшафтов включала следующие основные этапы:

- выбор параметров для сравнения морфологической структуры изучаемых ландшафтов в разное время на основе соответствующей модели;
- выбор эталонных участков по данным дистанционного зондирования, литературным и иным источникам и выделение термокарстовых озер, как наиболее мобильных элементов морфологической структуры исследуемых ландшафтов в пределах ключевых участков;
- сравнение эмпирических распределений площадей термокарстовых озер и значений 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 равнины, 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 заставляет сделать вывод, что изменение распределений площадей термокарстовых озер эрозионно-термокарстовых равнин, носит ограниченный характер. Проверка статистических различий между выборками 1961-1979 гг. и 2011-2019 гг. для каждого ключевого участка эрозионно-термокарстовых равнин по критерию Смирнова не выявила статистические 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 11 участков. Это означает, 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 генеральным совокупностям. Однако современные температурные тренды значимо коррелируют с изменением параметров модели.

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 км² (Колымская и Яно-Индибирская низменности, Ямал, Чукотка), расположенных 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 по 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, пересекающие 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 тоже 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).

Литература

1. Викторов А.С. Моделирование морфологических особенностей абразионных берегов с развитием оползневых процессов в криолитозоне // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2022. № 6. С. 28–37.
2. Гоников Т.В. Сравнительный количественный анализ морфологического строения грядовых ардных ландшафтов озерных котловин применительно к решению геоэкологических задач // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2021. № 6. С. 28–36.
3. 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.
4. Victorov A.S., Orlov T.V., Trapeznikova O.N., Kapralova V.N., Arkhipova M.V. 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
5. Victorov, A.S., Kapralova, V.N., Orlov T.V., Trapeznikova O.N., Arkhipova, M.V. Research into Cryolithozone Spatial Pattern Changes Based on the Mathematical Morphology of Landscapes. Energies 2022, 15, 1218. <https://doi.org/10.3390/en15031218>