

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ
ПРОЦЕССЫ

УДК 504.064.37

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ
МОРФОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ГРЯДОВЫХ АРИДНЫХ
ЛАНДШАФТОВ ОЗЕРНЫХ КОТЛОВИН ПРИМЕНИТЕЛЬНО
К РЕШЕНИЮ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

© 2021 г. Т. В. Гоников^{1,2,*}

¹ Географический факультет МГУ им. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, Москва, ГСП-1, 119991 Россия

² Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

*E-mail: gonikov.timur@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.04.2021 г.

После доработки 24.05.2021 г.

Принята к публикации 10.06.2021 г.

В статье представлены результаты сравнительного анализа ландшафтных морфологических структур двух крупных физико-географических объектов – бэровских бугров Северного Прикаспия и островных грядовых комплексов оз. Чад. Методами математической морфологии ландшафта установлено сходство в строении указанных ландшафтных рисунков, выраженное в логнормальном распределении диаметров гряд и пуассоновском распределении особых точек. Анализ проводился на четырех участках распространения бэровских бугров и двух участках оз. Чад. Количественные исследования морфологической структуры грядовых аридных ландшафтов озерных котловин дают новый материал для исследования происхождения этих ландшафтов. Предложены подходы к решению ряда геоэкологических и инженерных задач в подобных ландшафтах.

Ключевые слова: бэровские бугры, крупногрядовый рельеф, рисунок ландшафта, математическая морфология ландшафта, озеро Чад

DOI: 10.31857/S0869780921050052

ВВЕДЕНИЕ

Грядовые ландшафты побережий крупных внутриконтинентальных озер (Каспийское море, Балхаш, Аральское море, Чад) в аридных зонах являются исключительно динамичными комплексами. Использование их человеком сопряжено с такими сложностями, как высокая динамика уровня воды, опустынивание, активность эоловых процессов, засоление почв. Такая сложная картина требует поиска нового взгляда на проблему изучения структуры и динамики подобных ландшафтов и выработку геоэкологических технологий их освоения. Для решения значительного комплекса таких задач важны количественные закономерности, которым подчиняется развитие морфологической структуры ландшафтов (ландшафтный рисунок). Зачастую именно с этими закономерностями может быть связано решение задач оценки риска поражения негативными процессами. Частота чередования природно-территориальных комплексов, формирующих ландшафт, их линейные и площадные размеры нередко являются определяющими степень пригодности территории для прокладки инженерных

сооружений, возможные затраты и мероприятия по противодействию негативным процессам. Целый ряд исследований в последнее время посвящен изучению количественных характеристик ландшафтов, однако, большей частью подобные работы относятся к криолитозоне [3–5].

Цель настоящей работы – выявление количественных закономерностей морфологической структуры особого вида ландшафтов, а именно грядовых аридных ландшафтов озерных котловин, как основы для дальнейшего их использования при оценке геоэкологических условий строительства и эксплуатации инженерных сооружений. Решение задачи было основано на количественном анализе морфологической структуры ландшафтов-аналогов с элементами сравнительного анализа.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования выбраны:

- грядовые ландшафты Северного Прикаспия (бэровские бугры);
- грядовые ландшафты в районе оз. Чад.

Выбор этих объектов связан с тем, что они представлены обширными внутриконтинентальными экосистемами, формирующимися в условиях аридного климата, причем климатические особенности обусловили особые условия динамики данных ландшафтов – зависимость от колебаний уровня озер [1, 13]. Это привело к развитию ряда экзогенных процессов (эоловые процессы, засоление, морфолитодинамика), которые и определили существующую морфологическую структуру [19]. На территории РФ грядовые аридные ландшафты Прикаспия являются ареной строительства и эксплуатации значительных линейных сооружений.

Наиболее обширное распространение бэровских бугров приходится на западную часть дельты р. Волга. Эти ландшафты также известны под названием Западные ильмени. Здесь бэровские бугры простираются на сотни километров, имея строго широтное направление. В восточной части волжской дельты распространены Восточные ильмени. Их площадь много меньше, направление гряд также широтное. Многочисленные гряды разбросаны так же и по площади современной дельты, но они частично разрушены деятельностью водотоков, поэтому их морфология отличается от грядово-волнистых ландшафтов Западных и Восточных ильменей. Другой ареал распространения бугров находится в западной части дельты р. Урал, южнее обширных территорий Рын-песков в Прикаспийской низменности, расположенных на водоразделе рек Волга и Урал. Еще один крупный ареал располагается между дельтами рек Эмба и Урал [2, 9, 12].

Природным особенностям грядовых ландшафтов бэровских бугров посвящено много исследований, а их происхождение много десятилетий является предметом дискуссий. Как правило, исследователями рассматриваются четыре основные гипотезы: морская, эрозийная, эоловая и полигенетическая [2, 14, 15]. В своем типичном проявлении ландшафт бэровских бугров представляет собой сочетание злаково-пустынных урочищ на грядах с урочищами межбугровых пространств. Вариации межбугровых комплексов представлены солончаковыми комплексами, ильменями (или ериками) или зональными полупустынными комплексами. Нередко встречаются участки эолового переувлажнения, чаще всего они приурочены к склонам бугров или понижениям.

Грядовые комплексы оз. Чад располагаются непосредственно в чаше озерной котловины, образуя массивные скопления субпараллельных островов (рис. 1, 2). Работ, посвященных происхождению грядовых островных образований оз. Чад, не очень много. В основном акцент смещен на изучение динамики уровня озера. Большинство авторов указывает на их эоловое происхождение,

называя гряды “дюнами” [1, 17]. Однако некоторые исследователи указывают на необходимость более детального изучения генезиса гряд в совокупности с морфолитогенной динамикой озера [16]. В русскоязычной литературе эти островные комплексы упоминаются как эоловые дюны [7].

Озеро Чад в определенном смысле является пространственным аналогом Аральского моря. За последние 70 лет оз. Чад испытало значительное обмеление (до 5 м), сопровождающееся резким уменьшением водной поверхности озера (до 60%). Кроме того, колебания уровня озера могут сильно меняться в зависимости от сезона. В настоящее время большинство работ по изучению Чада посвящено колебанию его уровня [1]. История колебания уровня вод в голоцене обусловила специфическую динамику грядовых комплексов с образованием различных типов островных природно-территориальных комплексов (см. рис. 1) [18]. На больших площадях, осушенных в результате обмеления озера, образовался полосчатый ландшафтный рисунок, состоящий из грядовых островных комплексов, имеющих общую ориентацию с северо-запада на юго-восток. Часть этих гряд существовала еще до начала фиксации активного обмеления озера, другая часть появилась на осушенных площадях совсем недавно [7].

Спецификой настоящего исследования является подход, основанный на изучении рисунка ландшафта или ландшафтной мозаики территории [4]. Основной методический подход – анализ ландшафтных рисунков выделенных объектов в рамках математической морфологии ландшафта, и их последующее сопоставление.

Методика исследования включала следующие основные процедуры: 1) выбор эталонных участков, отражающих ландшафтные мозаики; 2) подбор материалов данных дистанционного зондирования (ДДЗ) для каждого эталонного участка; 3) создание схем ландшафтного дешифрирования; 4) выбор и получение морфометрических характеристик; 5) проверка полученных данных на соответствие статистическим законам распределения.

1. Выбор эталонных участков, отражающих ландшафтные мозаики. Было выбрано 6 участков, 4 из них представляют ландшафты Прикаспия с массовым распространением бэровских бугров. Другие два относятся к оз. Чад, его северной и южной части соответственно. Критериями выбора участка являлись массивность распространения грядовых комплексов, а также морфологическая однородность рисунка [4].

2. Подбор материалов ДДЗ для каждого эталонного участка. Основные материалы: цифровые модели рельефа (ЦМР) “Srtm” (90 м/пикс) и высокодетальные снимки “WorldView-1”. Разрешение использованных высокодетальных снимков

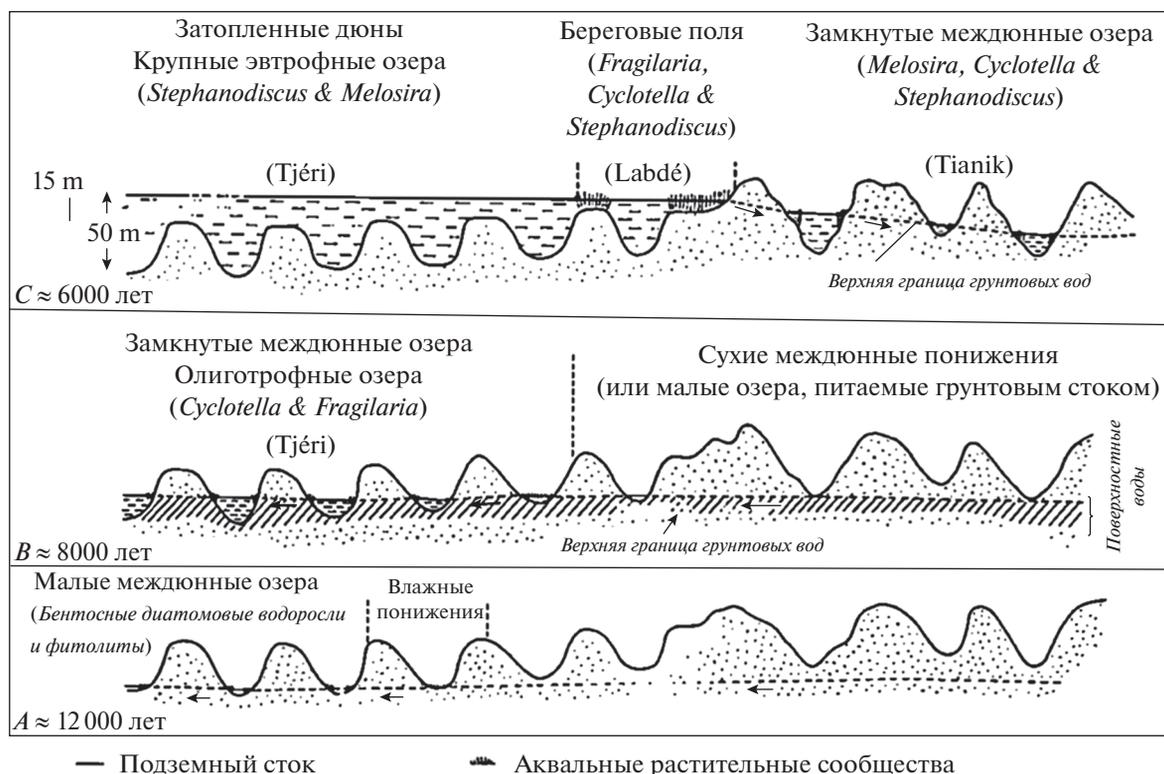


Рис. 1. Динамика грядовых комплексов оз. Чад в голоцене по [18].

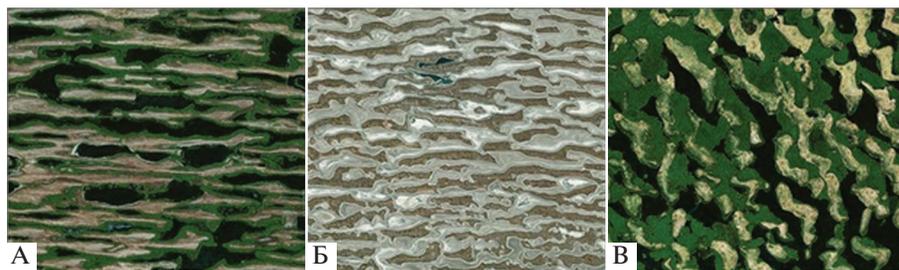


Рис. 2. Примеры изображений массового распространения грядовых структур. А – бэровские бугры в сочетании с ильменями в пределах палеодельты Волги, Б – бэровские бугры в сочетании с сорowymi солончаками в дельте Урала, В – грядовые комплексы оз. Чад.

1 м/пикс. В ходе работы использовалась стандартная цветопередача. Подобная точность отражения рельефа не позволила использовать автоматическое выделение грядовых комплексов, поэтому данные ЦМР использовались во вспомогательных целях при проведении ручного дешифрирования комплексов.

3. Создание схем ландшафтного дешифрирования методом ручного дешифрирования высокодетальных космических снимков в программной среде ArcMap 10.3. В нашем случае акцент был сделан на выделение групп урочищ, представляющих песчаные вытянутые гряды, занятые различными полупустынными фитоценозами, и по-

ниженных участков, занятых солончаковыми комплексами. Подобная специфика определяется однородным бидоминантным строением рисунка грядово-волнистых ландшафтов Прикаспия.

4. Выбор и получение морфометрических характеристик. Морфологическая структура ландшафта в нашем случае отражается двумя типами показателей. Первые – это параметры, характеризующие морфометрические особенности бэровских бугров. Вторые – особые точки, характеризующие особенности расположения грядовых комплексов в пространстве.

К параметрам, характеризующим морфометрию гряд, относились:

а) *диаметры гряд*, представляющие из себя длину отрезка, проведенную между точкой начала и конца каждой гряды – в системе ГИС линейные векторные объекты, длина которых рассчитывалась автоматически;

б) *площади гряд*, аналогичные площади векторных полигонов (ландшафтные контуры); расчет площадей ландшафтных контуров проводился автоматически в программе ArcMap 10.3;

в) *периметры гряд* (длина границы ландшафтного контура); расчет периметров ландшафтных контуров проводился автоматически в программе ArcMap 10.3.1.

К показателям расположения гряд в пределах однородных ландшафтных рисунков относились “особые” точки морфологической структуры:

а) *число точек начал гряд*; точками начал гряд условно считались точки западной ориентации гряд (все бугры независимо от участка имеют субширотную ориентацию). Их получение сводилось к автоматическому определению крайних западных точек отрезков, представляющих диаметры грядовых комплексов;

б) *число точек пересечения и примыкания гряд*. В рамках нашей работы точки примыкания и пересечения рассматривались совместно и расставлялись вручную, так как автоматический алгоритм этой процедуры показывал неудовлетворительные результаты. Часто точки примыкания совпадали с начальными и конечными точками, но рассматривались отдельно, так как являются существенно иной характеристикой;

в) *число точек окончания гряд*. Точками окончания гряд считались восточные точки каждой отдельной гряды. Их получение сводилось к автоматическому определению крайних восточных точек отрезков, представляющих диаметры гряд.

5. *Проверка полученных данных на соответствие статистическим законам распределения*. Полученные характеристики проверялись на соответствие статистическим законам распределения в программе Statistica 13.

Распределение таких параметров, как длина, периметр и площадь гряд проверялось на соответствие логнормальному, гамма- и экспоненциальному законам распределения по критерию Пирсона. Начальной нулевой гипотезой являлась гипотеза об отсутствии различий между теоретическим и эмпирическим законом распределения. Выходной параметр, позволяющий судить о сходстве теоретического и существующего распределения, – величина p , представляющая собой вероятность превышения фактического значения χ^2 . В том случае, если ее значение превышает 0.05, в рамках данного исследования корректно гово-

рить, что распределение данных соответствует проверяемому статистическому закону на уровне значимости 0.95 [8, 10].

Показатели расположения гряд (число точек начала, пересечений и окончаний) проверялись на соответствие закону Пуассона. Для этого еще на этапе работ по получению соответствующих величин, в программе ArcMap 10 специальным модулем Poisson на каждый эталонный участок накладывались четыре векторных площадных слоя. Каждый из четырех слоев представлял собой 100 случайно заданных окружностей (пробных площадок), радиус которых был равен R , $1.5R$, $2R$, $3R$ соответственно, где R – радиус окружности первого векторного слоя (базовый), определялся по формуле:

$$R = \sqrt{\frac{s}{\pi n}}, \quad (1)$$

где s – площадь участка; n – число контуров гряд.

Модуль автоматически рассчитывал, какое число точек попадает в окружность и создавал массив данных “Join count”. Этот массив и был предметом анализа на соответствие распределения числа точек закону Пуассона в программе Statistica 13. Таким образом, на каждом эталонном участке расположение гряд характеризовалось тремя морфометрическими величинами, по каждой из которых анализировались четыре выборки, соответствующие четырем разным размерам пробных площадок (окружностей).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выполненный анализ морфологических структур позволил получить ряд количественных закономерностей. Одним из наиболее важных результатов является то, что на всех 6 участках показатели длин гряд и их периметров распределены по закону близкому к логнормальному. Значения p колеблются от 0.068 до 0.818 (табл. 1).

Плотность распределения диаметров гряд (d) в пределах однородного участка задается выражением:

$$f_d(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(\ln x - a)^2 / 2\sigma^2}, \quad (2)$$

где a и σ – параметры распределения.

Сходство в логнормальном распределении диаметров гряд двух объектов хорошо прослеживается на полученных графиках плотностей распределений, представленных на рис. 3. Пик значений в обоих случаях приходится на длины 1000–1500 м.

Площадь гряд в двух случаях подчиняется экспоненциальному распределению, в других двух – логнормальному, еще в одном говорить о каком-то соответствии статистическим законам распре-

Таблица 1. Результаты оценки согласия эмпирических распределений морфометрических характеристик гряд с различными статистическими законами распределения

№ участка	Морфометрические характеристики	Объем выборки	Среднее значение	<i>p</i>	
				Распределение	
				логнормальное	экспоненциальное
1 (Дельта Волги)	Диаметры гряд	356	2194	0.492	0.000
	Площадь гряд		617972	0.000	0.217
	Периметр гряд		4737	0.818	0.000
2 (Дельта Урала)	Диаметры гряд	279	2008	0.222	0.000
	Площадь гряд		482397	0.000	0.269
	Периметр гряд		4289	0.068	0.000
3 (Дельта Урала)	Диаметры гряд	192	1412	0.053	0.000
	Площадь гряд		1322972	0.599	0.000
	Периметр гряд		4712	0.192	0.000
4 (Дельта Урала)	Диаметры гряд	142	2493	0.096	0.000
	Площадь гряд		996539	0.495	0.000
	Периметр гряд		5646	0.054	0.000
5 (Чад)	Диаметры гряд	482	2357	0.072	0.000
	Площадь гряд		6548.78	0.523	0.000
	Периметр гряд		2431764	0.288	0.068
6 (Чад)	Диаметры гряд	282	1692	0.288	0.000
	Площадь гряд		1256916	0.013	0.396
	Периметр гряд		4584	0.129	0.000

Жирным шрифтом выделены случаи согласия эмпирического и соответствующего теоретического распределения на уровне значимости 0.95.

деления не представляется возможным (см. табл. 1). Поэтому интерпретировать поведение данной морфометрической характеристики сложно.

Анализ дискретных показателей, характеризующих расположение гряд, продемонстрировал более пеструю картину (табл. 2).

В первую очередь обращает на себя внимание, что в большинстве случаев для всех групп точек закон Пуассона выполняется для участков, представляющих оз. Чад (p от 0.259 до 0.769). Хуже всего закон Пуассона выполняется на 3-м и 4-м участках. Однако на участках № 1 и № 2 закон Пуассона подтверждается. Случаи, когда закон Пуассона не выполняется, интерпретировать сложно. Данное обстоятельство нуждается в дополнительном исследовании. Результаты данных расчетов указывают, что особые точки морфологической структуры в 4-х случаях из 6 распределены по закону Пуассона. Это позволяет нам говорить, что закономерность морфологической структуры ландшафтов существует, как для бэровских бугров в дельте Урала, так и в районе оз. Чад.

Таким образом, периметры и длины грядовых структур аридных ландшафтов озерных котловин распределены логнормально внутри участков с

однородным ландшафтным рисунком, а точки начал, пересечений и окончания гряд в большинстве случаев подчиняются распределению Пуассона.

Выполненное исследование дает новый материал для решения вопроса о происхождении грядовых ландшафтов озерных котловин и бэровских бугров в частности. Установленные эмпирически закономерности указывают на сходство ландшафтных рисунков с участием бэровских бугров в пределах Северного Прикаспия и грядовых комплексов оз. Чад.

Однако изучение ландшафтного рисунка — лишь один из аспектов исследований сложных природных объектов. Результаты представленных выше расчетов не могут интерпретироваться как доказательство генетического сходства ландшафта бэровских бугров и грядового ландшафта в районе оз. Чад, скорее они указывают на необходимость более детальных сравнительных геоморфологических исследований.

С этой точки зрения, в работе затрагивается вопрос изучения крупногрядового рельефа котловин аридных озер в глобальном пространственном аспекте. Особенно интересным данный во-

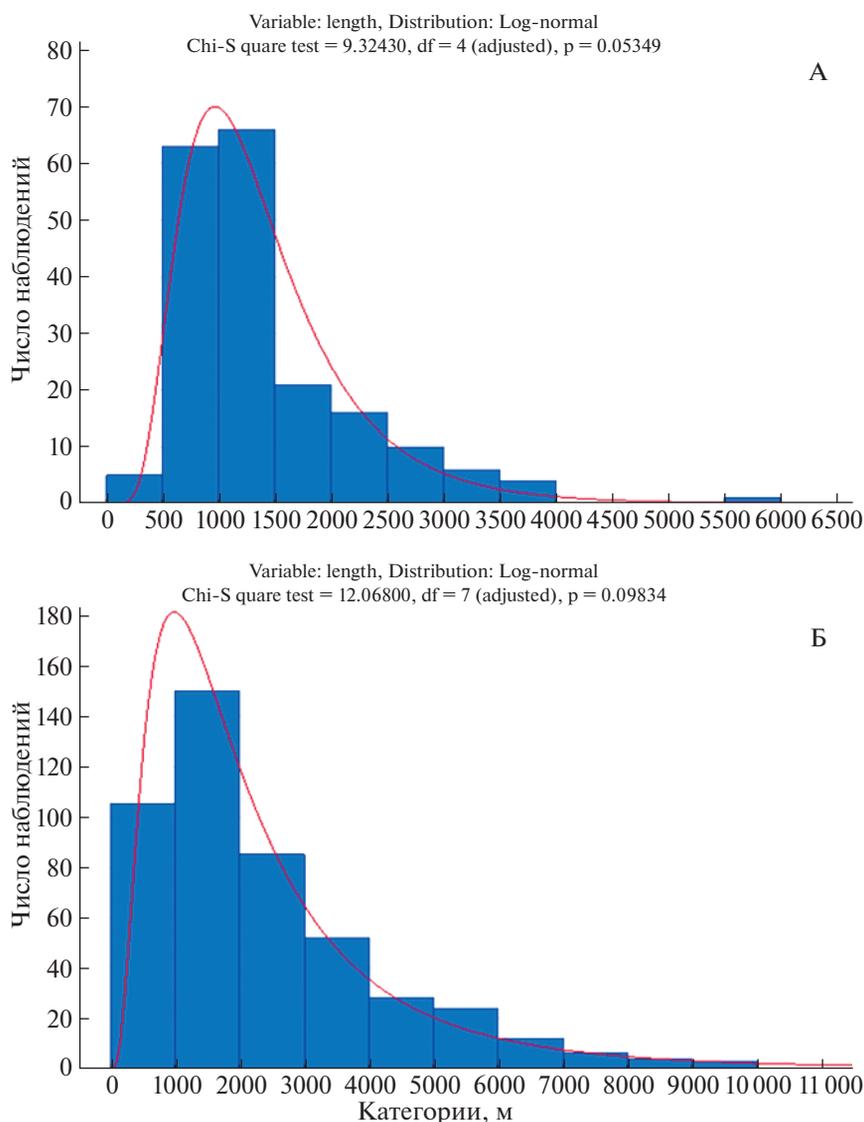


Рис. 3. Теоретический (линия) и эмпирический (гистограмма) график плотности логнормального распределения диаметров на участке: А – № 4 (дельта р. Урал), Б – № 5 (оз. Чад).

прос предстает в связи с колебаниями уровней крупных аридных озерных геосистем и связанными с ними процессами морфолитогенной динамики [1, 7].

Изучение динамики грядовых комплексов в котловине Чада может дать новые данные для исследования формирования крупногрядового рельефа, в частности бугров Бэра. Так, сравнение разновременных космических снимков (в период с 1970 г. по настоящее время) позволяет отметить появление грядовых структур в северной и южной частях котловины оз. Чад. Их образование зачастую наблюдается в аквальных условиях, а ориентация не всегда соответствует направлению ветров, что позволяет усомниться в однозначности их эолового генезиса. На наш взгляд, необхо-

димо изучить данные процессы формирования гряд в связи с морфолитогенной динамикой озер и деятельностью течений. В этой связи, исследование может опираться на морскую гипотезу происхождения бэровских бугров [6, 11].

Полученные закономерности в определенной степени противоречат полигенетической теории генезиса бугров, предложенной в недавнее время [14]. В настоящее время отсутствуют результаты, свидетельствующие о том, что полигенетические рисунки описываются строгими статистическими законами. Помимо этого, в полигенетической теории фигурируют эрозионные процессы, а изученные крупногрядовые рисунки не указывают на сходство с эрозионными структурами, так как математические модели последних основаны на

Таблица 2. Результаты расчета оценки эмпирических распределений “особых” точек морфологической структуры на соответствие закону Пуассона

№ участка	Особые точки морфологической структуры	Количество точек	<i>p</i>			
			Закон Пуассона			
			<i>R</i>	1.5 <i>R</i>	2 <i>R</i>	3 <i>R</i>
1 (Дельта Волги)	Точки начал гряд	163	0.044	0.331	0.098	0.199
	Точки сочленения гряд	124	0.019	0.510	0.373	0.108
	Точки окончания гряд	184	0.115	0.170	0.109	0.031
2 (Дельта Урала)	Точки начал гряд	187	0.010	0.010	0.115	0.904
	Точки сочленения гряд	118	0.118	0.245	0.223	0.766
	Точки окончания гряд	183	0.006	0.100	0.460	0.007
3 (Дельта Урала)	Точки начал гряд	189	0.012	0.005	0.000	0.000
	Точки сочленения гряд	105	0.267	0.471	0.117	0.013
	Точки окончания гряд	190	0.000	0.000	0.000	0.000
4 (Дельта Урала)	Точки начал гряд	135	0.068	0.004	0.000	0.000
	Точки сочленения гряд	191	0.526	0.007	0.001	0.201
	Точки окончания гряд	130	0.011	0.010	0.000	0.000
5 (Чад)	Точки начал гряд	269	0.716	0.001	0.304	0.738
	Точки сочленения гряд	270	д.о.	0.259	0.623	0.756
	Точки окончания гряд	115	0.033	0.688	0.485	0.769
6 (Чад)	Точки начал гряд	275	0.016	0.349	0.703	0.316
	Точки сочленения гряд	114	0.402	0.669	0.641	0.048
	Точки окончания гряд	264	0.008	0.679	0.485	0.433

Жирным шрифтом выделены случаи согласия эмпирического и теоретического распределения на уровне значимости 0.95.

экспоненциальных законах распределения [4]. Исходя из этого, рассмотрение эрозионного генезиса бугров с позиций математической морфологии ландшафта нецелесообразно.

Более сложным представляется и вопрос о сопоставлении бугров с типичными эоловыми образованиями. Рисунки эоловых равнин весьма разнообразны и мало изучены с применением аппарата математической морфологии. Созданная каноническая модель морфологической структуры грядового эолового ландшафта указывает на экспоненциальное распределение [4], что отличается от полученных нами результатов. Однако эта модель не описывает все типы морфологии эоловых равнин. Данный вопрос нуждается в дальнейшем изучении, поэтому теория эолового генезиса бэровских бугров также может быть рассмотрена в рамках математического изучения рисунков.

Полученные количественные закономерности в последующем могут быть использованы для решения различных задач. Так, логнормальность распределения длин гряд и пуассоновский характер их расположения позволяют при проектировании трубопровода или другого линейного сооружения аналитически определить вероятност-

ное распределение числа отрезков линейного сооружения, приходящихся на участки с агрессивными эколого-геохимическими условиями (соровые участки). Предположим, что проектируется сооружение длиной L . Исходным является тот факт, что в силу чередования число отрезков линейного сооружения, приходящихся на гряды, и число отрезков, приходящихся на соры¹, равны. Созданная модель позволяет для получения искомого распределения использовать комплексирование решений, полученных для оценки поражения трубопроводов термокарстовыми процессами при произвольной форме очагов [3, 4]. При этом для числа отрезков сооружения, приходящихся на гряды, получаем распределение Пуассона:

$$P(v) = \frac{(\beta\gamma L)^v}{v!} e^{-2\beta\gamma L},$$

где β — средняя проекция гряды на ось перпендикулярную к данному линейному сооружению, γ —

¹ Соры (соровые бессточные понижения) — это и форма аридного рельефа, и уникальный ландшафт, в котором протекают одновременно специфические геоморфологические, гидрогеологические, геохимические, микробиологические и почвенные процессы).

средняя плотность расположения гряд. Учитывая постоянство угла пересечения гряд и сооружения (α) и выражение для средней длины гряды при ее распределении по логнормальному закону [8], получаем:

$$\beta = \exp(0.5\sigma^2 + a) \sin \alpha,$$

где a и σ – параметры распределения длин гряд.

Из полученного распределения числа отрезков сооружения, приходящихся на гряды, следует, в частности, что среднее число пересечений гряд, а значит и соровых участков, дается выражением:

$$\bar{v} = \gamma L \exp(0.5\sigma^2 + a) \sin \alpha,$$

со средней длиной сооружения, приходящейся на соровые участки:

$$L_s = \gamma w L \exp(0.5\sigma^2 + a) \sin \alpha,$$

где w – средняя ширина сора.

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

1. Эмпирические данные указывают на логнормальный характер распределения длин гряд в грядовых аридных ландшафтах озерных котловин и пуассоновское распределение их особых точек (начало, окончание, примыкание) в разных физико-географических условиях.

2. Количественные исследования морфологической структуры грядовых аридных ландшафтов озерных котловин дают новый материал для исследования их происхождения через сравнительный анализ и сопоставление ландшафтов крупных озерных экосистем в аридных регионах.

3. Выявленные закономерности морфологической структуры грядовых аридных ландшафтов озерных котловин могут быть использованы при оценке геоэкологических условий строительства, эксплуатации инженерных сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абоссоло С.Э. Факторы формирования многолетних и межгодовых изменений уровня озера Чад: дисс....канд. геогр. наук. СПб.: РГГМУ, 1996. <https://www.dissercat.com/content/factory-formirovaniya-mnogoletnikh-i-mezhgodovykh-izmenenii-urovnya-ozera-chad>
2. Белевич Е.Ф. О происхождении бугров Бэра // Геоморфология. 1979. № 2. С. 57–68.
3. Викторов А.С., Орлов Т.В., Садков С.А., Трапезникова О.Н. Использование подходов математической морфологии ландшафта при дистанционной оценке природных опасностей // Геоэкология. 2019. № 5. С. 61–73.
4. Викторов А.С. Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука, 2006. 252 с.
5. Гоников Т.В., Викторов А.С. Модель морфологической структуры грядовых эоловых ландшафтов, сформировавшихся на основе барханных цепей // Геоэкология. 2020. № 5. С. 32–39.
6. Жиндарев Л.А., Никифоров Г.И., Рычагов Л.Г. Морфолитодинамика береговой зоны приустьевых областей и проблема происхождения бэровских бугров // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2001. № 1. С. 44–52.
7. Климанова О.А., Царева О.В. Изменение природных комплексов в котловине озера Чад в 1987–2007 гг. в условиях глобальных климатических изменений // Проблемы региональной экологии. 2014. Т. 3. С. 79–84.
8. Королюк В.С., Портенко Н.И., Скороход А.В., Турбин А.Ф. Справочник по теории вероятностей и математической статистике. М.: Наука, 1985. 640 с.
9. Нижняя Волга: геоморфология, палеогеография и русловая морфодинамика / Под ред. Г.И. Рычагова и В.Н. Коротаева. М.: ГЕОС, 2002. 242 с.
10. Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях. М.: Изд. центр “Академия”, 2004. 416 с.
11. Рычагов Г.И. Новые данные о генезисе и возрасте бэровских бугров // Вестник Московского университета. Сер. 5: География. 2009. № 5.
12. Рычагов Г.И. Плейстоценовая история Каспийского моря. М.: Изд-во МГУ, 1997. 268 с.
13. Свиточ А.А. Большой Каспий: строение и история развития. М.: Изд-во МГУ, 2014. 272 с.
14. Свиточ А.А., Ключиткина Т.С. Бэровские бугры Нижнего Поволжья. М.: Типография Россельхозакадемии, 2006. 160 с.
15. Badyukova E.N. Genesis of the baery knolls developed in the northern caspian plain // Quaternary International. 2018. V. 465. № A. P. 11–21.
16. Durand A. Oscillations of Lake Chad Over The Past 50,000 Years: New Data and New Hypothesis // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 39 (1982): 37–53.
17. Grove A.T. The Ancient Erg of Hausaland, and Similar Formations on the South Side of the Sahara // The Geographical Journal. 1958. V. 124. № 4. P. 528–533.
18. Lake Chad: ecology and productivity of a shallow tropical ecosystem. Carmouze J.P., Durant J.R., Lévêque C. (eds.). Springer Science & Business Media, 2012. 576 p.
19. Tabetinova A.S. Geocological zoning of the North-eastern Caspian // Arid Ecosystems. 2020. V. 26. № 3. P. 211–218.

GEOECOLOGICAL LANDSCAPE PATTERN COMPARISON OF RIDGE LANDSCAPES IN ARID LAKE BASINS

T. V. Gonikov^{a,b,#}

^a Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991 Russia

^b Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS, Ulanskii per., 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia

[#]E-mail: gonikov.timur@yandex.ru

The paper presents the results of landscape pattern comparison between Baer mounds in the Northern Caspian region and Lake Chad dune islands. Using the methods of mathematical landscape morphology, a similarity was established in the structure of indicated landscape patterns expressed in the lognormal distribution of ridge diameters and the Poisson distribution of specific points. Four sections of the Baer mounds distribution and two sections of Lake Chad were analyzed. The necessity for a comprehensive comparative analysis is pointed out, taking into account the structural similarity of landscape pattern and a number of physical and geographical patterns. The foundations have been laid for solving a number of geoeological engineering problems in ridge coastal landscapes.

Keywords: Baer mounds, ridge landforms, landscape pattern, mathematical morphology of landscape, Caspian lowland, Lake Chad

REFERENCES

1. Abossolo, S.E. *Fakторы formirovaniya mnogoletnikh i mezhgodovykh izmenenii urovnya ozera Chad* [Factors of the formation of long-term and interannual changes in the water level of Lake Chad]. Extended abstract Cand.Sci. (Geogr.) Dissertation, St.Petersburg, RGGMU, 1996. (in Russian)
2. Belevich, E.F. *O proiskhozhdenii bugrov Bera*, [On the origin of the Baer]. *Geomorfologiya*. 1979, no. 2, pp. 57–68. (in Russian)
3. Viktorov, A.S., Orlov, T.V., Sadkov, S.A., Trapeznikova, O.N. *Ispol'zovanie podkhodov matematicheskoi morfologii landshafta pri distantsionnoi otsenke prirodnykh opasnostei* [Remote assessment of natural hazards on the base of the mathematical morphology of landscape]. *Geoekologiya*, 2019, no. 5, pp. 61–73. (in Russian)
4. Viktorov, A.S. *Osnovnye problemy matematicheskoi morfologii landshafta* [The main issues of the mathematical morphology of landscape]. *Moscow, Nauka*, 2006, 252 p. (in Russian)
5. Gonikov, T.V., Viktorov, A.S. *Model' morfologicheskoi struktury gryadovykh eolovykh landshaftov, sformirovannykh na osnove barkhannykh tsepei* [The model of morphological structure of aeolian ridge landscapes formed by barchan chains]. *Geoekologiya*, 2020, no. 5, pp. 32–39. (in Russian)
6. Zhindarev, L.A., Nikiforov, G.I., Rychagov L.G. *Morfolitodinamika beregovoi zony priust'evykh oblastei i problema proiskhozhdeniya berovskikh bugrov* [Morpholodynamics of the coastal zone of estuarine areas and the problem of the origin of the Baer hummocks]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*, 2001, no. 1, pp. 44–52. (in Russian)
7. Klimanova, O.A., Tsareva, O.V. *Izmenenie prirodnykh kompleksov v kotlovine ozera Chad v 1987–2007 gg. v usloviyakh global'nykh klimaticheskikh izmenenii* [Changes in natural complexes in the Lake Chad basin in 1987–2007 in the context of global climate changes]. *Problemy regional'noi ekologii*. 2014, vol. 3, pp. 79–84. (in Russian)
8. Korolyuk, V.S., Portenko, N.I., Skorokhod, A.V., Turbin, A.F. *Spravochnik po teorii veroyatnostei i statistike* [Handbook on probability theory and statistics]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 640 p. (in Russian)
9. *Nizhnyaya Volga: geomorfologiya, paleogeografiya i ruslovaya morfodinamika* [The Lower Volga River area: geomorphology, paleogeography and channel morpholithodynamics]. G.I. Rychagov and V.N. Korotaev, Eds., Moscow, GEOS, 2002, 242 p. (in Russian)
10. Puzachenko, Yu.G. *Matematicheskie metody v ekologicheskikh i geograficheskikh issledovaniyakh* [Mathematical methods in geographic and ecological research]. Moscow, Akademiya Publ., 2004, 416 p. (in Russian)
11. Rychagov, G.I. *Novye dannye o genezise i vozraste berovskikh bugrov* [New data on the genesis and age of the Baer hillocks]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*. 2009, no. 5, pp. 59–68. (in Russian)
12. Rychagov, G.I. *Pleistotsenovaya istoriya Kaspiiskogo morya* [Pleistocene history of the Caspian Sea]. Moscow, MGU Publ., 1997, 268 p. (in Russian)
13. Svitoch, A.A. *Bol'shoi Kaspii: stroenie i istoriya razvitiya* [The Greater Caspian region: structure and history]. Moscow, MGU Publ., 2014, 272 p. (in Russian)
14. Svitoch, A.A., Klyuvitkina, T.S. *Berovskie bugry Nizhnego Povolzh'ya* [Baer mounds of the Lower Volga region]. Moscow, Rossel'khozakademiya Publ., 2006, 160 p. (in Russian)
15. Badyukova, E.N. Genesis of the Baer knolls developed in the Northern Caspian Plain. *Quaternary International*, 2018, vol. 465, no. A. pp. 11–21.
16. Durand, A., Oscillations of Lake Chad over the Past 50,000 Years: New Data And New Hypothesis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1982, no. 39, pp. 37–53.
17. Grove, A.T. The ancient erg of hausaland, and similar formations on the south side of the Sahara. *The Geographical Journal*, 1958, vol. 124, no. 4, pp. 528–533.
18. Lake Chad: ecology and productivity of a shallow tropical ecosystem. Carmouze J.P., Durant J.R., Lévêque C., Eds. Springer Science & Business Media, 2012, 576 p.
19. Tabelinova, A.S. Geoeological zoning of the North-eastern Caspian. *Arid Ecosystems*, 2020, vol. 26, no. 3. pp. 211–218.