

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНО-ГРЯДОВЫХ ЭОЛОВЫХ РАВНИН ПО МАТЕРИАЛАМ КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК

© 2025 г. Т. В. Гоников¹, А. В. Зверев¹, С. М. Шадчинов², В. В. Гоников³

¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Москва, Россия

²Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 09.08.2024 г.

Работа представляет результаты исследования строения ландшафтного рисунка, сформированного скоплениями продольных барханов, методами математической морфологии ландшафта. Выявлены количественные закономерности распределения длин барханов (логнормальное распределение) и пространственного распределения точек начал, окончания и пересечения эоловых форм (пуассоновское распределение) в разных физико-географических регионах. Указано на сходство строения рисунками с другими типами эолового морфогенеза.

Ключевые слова: эоловые процессы, продольные барханы, математические модели в географии, ландшафтный рисунок, математическая морфология ландшафта

DOI: 10.31857/S0205961425020058, **EDN:** EJQEUR

ВВЕДЕНИЕ

Многообразие эолового рельефа давно привлекает внимание исследователей и заставляет использовать комплексные подходы к изучению факторов эолового морфогенеза. Обращает на себя внимание большое количество и разнообразие тех ландшафтных рисунков, которые образуют скопления различных эоловых форм. Оно обусловлено внутренней сложностью процессов, которые по-разному проявляют себя в разных физико-географических условиях. Одним из наиболее примечательных типов таких эоловых форм являются “продольные барханы” (Федорович, 1983; Lancaster, 2009). В зарубежных исследованиях обозначаются как “linear dunes” или “longitudinal dunes” (Lancaster, 1982). В рамках нашего исследования как синонимы использовались понятия “продольные барханы” и “параллельные эоловые гряды”. Морфология таких структур представляет из себя вытянутые прямые барханы с длинами до сотен километров, расположенных субпараллельно, относительными превышениями до 300 м (Tsoar, 1982). Основными условиями возникновения продольных барханов служит большое количество песчаного материала, бимодальный пассатный тип режима ветров с высокими показателями скорости и обширные площади субгоризонтальных поверхностей. Именно бимодальный режим ветров, когда устойчиво формируются два ветра, меняющих направления в пределах 20–30 градусов, позволяют бархану принимать вытянутую параллельно на-

правлению ветров форму и простираются на многие километры (Parteli, Duran, Tsoar, 2009). На сегодняшний день также накоплен обширный материал по внутреннему строению толщ параллельных барханов (Bristow, Baily, 2000), развиваются подходы к изучению их динамики и моделирования (Rozier, Narteau, 2019; Livingstone, 1988; Guignier, Niiya, Nishimori, 2013). В последние десятилетия активно развиваются подходы к математическому моделированию эоловых процессов на основе физических параметров сред и потоков. При этом пространственное моделирование остается на втором плане.

Целью данного исследования являлось выявление количественных закономерностей строения ландшафтного рисунка (морфологической структуры) ландшафтов с массовым распространением параллельных эоловых гряд (рис. 1). Математическая морфология ландшафта, как развивающееся направление с набором собственных методов (Викторов, 2006), способна по-новому рассмотреть вопрос динамики эоловых структур через пространственно-стохастические особенности эоловых рисунков.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методика количественного исследования закономерностей строения ландшафтных рисунков представляла следующий алгоритм:

- выбор эталонных участков дешифрирования и количественной оценки;



Рис. 1. Ландшафтный рисунок, сформированный продольными барханами в Южной Сахаре.

- подбор материалов данных дистанционного зондирования для каждого эталонного участка;
- создание схем дешифрирования барханных гряд;
- количественный анализ морфологической структуры.

1. Выбор эталонных участков дешифрирования и количественной оценки. Было выделено 4 эталонных участка.

Выбранные объекты объединены тем, что относятся к крупным пустынным экосистемам с массовым распределением продольных барханов (Rubin, Hesp, 2009). Совокупность барханов на однородной поверхности формирует определенные участки морфологически однородных ландшафтных рисунков, которые и являются объектом нашего интереса. Именно внутренняя однородность определяет корректность последующего математического анализа. Как видно (рис. 2), участки относятся к пустыням Сахара, Руб-Эль-Хали, Симпсон и Виктория.

2. Подбор материалов ДДЗ для каждого эталонного участка. Основными материалами явились данные дистанционного зондирования: цифровые модели рельефа “Srtm” и высокдетальные снимки “GeoEye”. Разрешение использованных высокдетальных снимков — 1.8 м/пикс.

3. Создание схем дешифрирования барханных гряд. В процессе исследований производилось создание схем дешифрирования грядовых структур методом ручного дешифрирования высокдетальных космических снимков в программной среде “QGIS” (рис. 3).

4. Анализ морфологической структуры включал следующие основные элементы:

- Определение значений количественных показателей морфологической структуры.
- Статистический анализ выборок.

Количественный анализ морфологической структуры грядовых ландшафтов базировался на выбран-



Рис. 2. Схема расположения эталонных участков дешифрирования параллельно-грядовых эоловых гряд в разных физико-географических регионах.

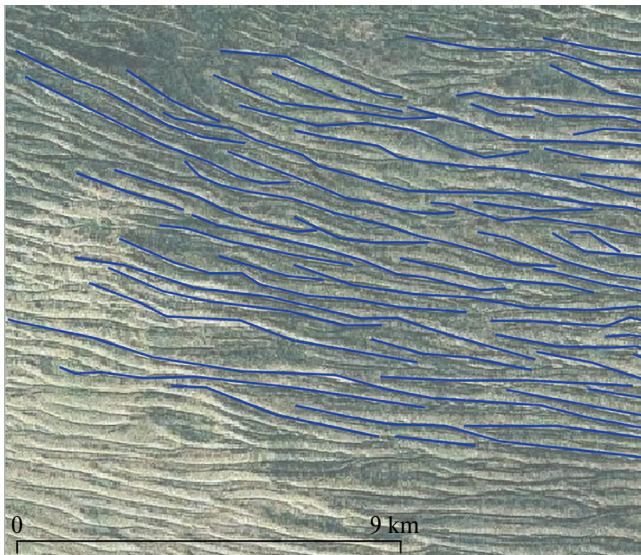


Рис. 3. Пример схемы дешифрирования барханов для участка “Виктория”. Синим выделены осевые линии барханных комплексов.

ном комплексе показателей. Морфологическая структура рассматриваемых ландшафтов отражается двумя основными типами показателей. Первые — это характеристики морфометрических особенностей эоловых гряд, вторые — характеристики расположения гряд в пространстве. К использованным параметрам, характеризующим морфометрию гряд, относятся длины гряд. Характеристики расположения гряд в пределах однородных ландшафтных рисунков основываются на исследовании “особых точек” морфологической структуры. К особым точкам относятся: а) точки начала гряд, б) точки пересечения и примыкания гряд, в) точки окончания гряд.

Статистический анализ выборок. Полученные характеристики проверялись на соответствие статистическим законам распределения в программе “Statistica 13”.

Морфометрический параметр длины гряд проверялись на соответствие нормальному, логнормальному, гамма- и экспоненциальному закону распределения. Критерием, указывающим на связь эмпирических данных с теоретическим законом, являлся критерий Пирсона (χ^2), частным показателем которого был параметр p (p -value). Начальной нулевой гипотезой являлась гипотеза об отсутствии различий между теоретическим и эмпирическим законом распределения. “ P -value” — величина, используемая при тестировании статистических гипотез; в том случае, если его значения превышают 0.01, в рамках данного исследования корректно говорить, что распределение данных соответству-

ет рассматриваемому статистическому закону на уровне значимости 0.99 (Крамер, 1975).

Распределение “особых точки морфологической структуры” проверялись на соответствие закону Пуассона. Для этого еще на этапе работ по получению соответствующих величин, в программе “ArcMap 10.3” специальным модулем “Poisson” на каждый эталонный участок накладывались три векторных площадных слоя. Каждый из трех слоев представлял собой 100 случайно разбросанных окружностей, радиус которых был равен R , $1.5R$, $2R$ соответственно, где R — радиус окружности первого векторного слоя, высчитывался по формуле:

$$R = \sqrt{\frac{s}{\pi n}},$$

где s — площадь участка, n — количество контуров гряд.

Модуль “Poisson” автоматически рассчитывал, какое число точек попадало в каждую окружность слоя и создавал массив данных “Join count”. Этот массив и был предметом анализа на соответствие закону распределения Пуассона в программе “Statistica 13”. Таким образом, на каждом эталонном участке расположение гряд характеризовалось тремя величинами (типы особых точек), по каждой из которых анализировались три выборки, соответствующие трем разным размерам пробных площадок (трем радиусам окружностей).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Один из наиболее известных ареалов распространения продольных барханов — это пустыня Сахара. Для создания схемы дешифрирования и анализа был выбран участок в южной части пустыни (территория Алжира), где распространены наиболее крупные и типичные продольные барханы, которые формируют параллельные грядовые рисунки. Пример ландшафтного рисунка (рис. 4). Преобладающее направление ветров северное и северо-восточное, среднегодовое количество осадков 90 мм. Гривы барханов на снимке дешифрируются четко, для рисунка характерно небольшое число примыкания гряд. Отчетливо виден вторичный, более мелкий, эоловый рельеф, представленный поперечными дюнами, которые занимают склоны крупных барханов. Они свидетельствуют об активности эоловых процессов в настоящее время, чему способствует отсутствие видимого задернения.

Второй объект исследования представлен эоловым полем в южных отрогах пустыни Руб-Эль-Хали (Аравийский полуостров) (рис. 5). Среднегодовое количество осадков 60–70 мм, направление ветров северо-западное. Примечательно, что в более

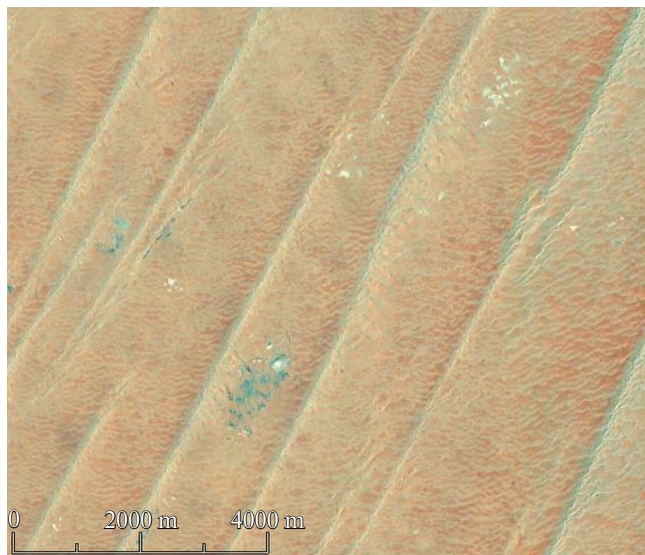


Рис. 4. Пример морфологической структуры продольных барханов участка “Сахара”.



Рис. 5. Пример морфологической структуры продольных барханов участка “Руб-Эль-Хали”.

крупном масштабе эоловое поле имеет изгиб, принимает серповидную форму, меняя направление согласно деятельности ветров. При этом сохраняется строгая параллельность гряд, количество примыкания относительно невелико. Вершины гряд незадернованы, осложнены вторичным эоловым рельефом (поперечные дюны). Понижения между барханами имеют светло-серый тон, индицирующий следы засоления.

Третьим участком было выбрано однородное эоловое поле из пустыни “Виктория” (Южная Австралия) (рис. 6). Среднегодовое количество осадков здесь варьируется в пределах 200–250 мм, ветры

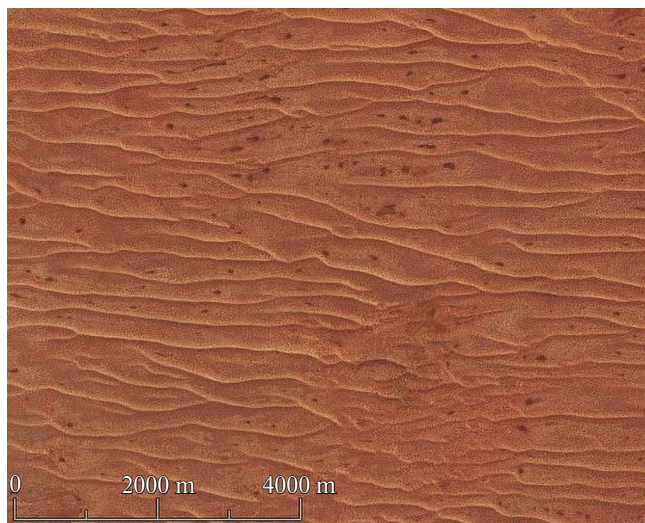


Рис. 6. Пример морфологической структуры продольных барханов участка “Виктория”.

преимущественно южные и юго-западные. Из всех участков для “Виктории” наблюдаются самые малые барханы, при этом наименее выпрямленные. Большое количество примыкания гряд, большое количество очень малых гряд. При этом в целом сохраняется строгое субгоризонтальное простирание, которое не совпадает с направлениями господствующих ныне ветров. Это объясняется тем, что барханы являются палеогеографическими реликтами, ныне закреплены растительностью и не подвергаются активному эоловому морфогенезу (Pell, Chivas, Williams, 1999).

Четвертый участок из Австралии представлен обширным эоловым полем из пустыни Симпсон. В отличие от пустынь юга Австралии, для барханов здесь характерно южное простирание, что вызвано господством южных ветров. Среднегодовое количество осадков 120 мм. Эоловые поля сформировались на аллювиальных равнинах, сложенных песчано-галечным материалом (Folk, 2006). Визуально барханы имеют меньший размер, если сравнивать их с участками “Сахара” и “Руб-Эль-Хали”. Наблюдается большое число примыкания гряд, форма не столь правильно прямая, есть участки с изгибами гряд. Дешифрируются отчетливо по яркому оранжевому тону, склоны частично задернованы кустарниками и злаками. При этом сами гряды демонстрируют проявления современного эолового переноса, дешифрируются незакрепленные песчаные участки.

Результаты расчетов статистических закономерностей строения эоловых гряд для четырех участков, представленные в таблице 1, демонстрируют целый ряд закономерностей.

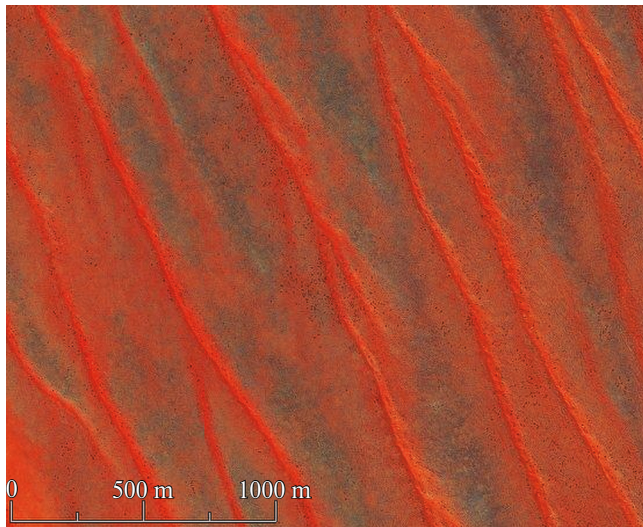


Рис. 7. Пример морфологической структуры продольных барханов участка “Симпсон”.

Во-первых, обращает на себя внимание различие в размерах объектов. Если участки “Сахара” и “Руб-Эль-Хали” показывают поразительно близкие значения средних длин гряд (45–46 км), участки “Виктория” и “Симпсон” оказываются значительно меньше со средними значениями длин в 5–7 км. Интересным вопросом является, обусловлено ли это изначальными различиями в физике протекающих процессов, условиями и факторами протекания эолового процесса, или быстрым задержанием поверхности между гряд, которое наблюдается на рис. 6–7. Предположительно, оно могло помешать австралийским барханам развиваться до более крупных структур.

Во-вторых, обращает внимание, что ни один из участков не показал совпадений с нормальным и экспоненциальным законом (табл. 1). Если отсутствие нормального распределения вполне ожидаемо и объяснимо тем, что оно редко встречается в практике исследований процессов с ведущим фактором формирования, то отсутствие экспоненциального закона указывает на некоторые отличия от других эоловых ландшафтных рисунков (Викторов, 2006).

Третья закономерность, полученная по результатам анализа — это логнормальное распределение длин барханов для всех четырех участков. Показатели p -value, полученные в промежутке от 0.093 до 0.576, значительно превышают уровень значимости в 0.01, что позволяет установить сходство с логнормальным распределением и определить его как основную количественную закономерность строения параллельно-грядовых эоловых равнин. Визуально распределения представлены на рисунке 8. Практика последних исследований показывает, что логнормальный закон встречается часто и для других ландшафтных рисунков, сформированных грядовым рельефом (продольные барханные цепи, рябь течения, бэровские бугры) (Гоников, Виктор, 2020; Бричева, Гоников, Панин и др., 2022). Подобное сходство в количественных закономерностях грядовых структур показывает, что логнормальное распределение может рассматриваться как общая закономерность для любых потоковых форм рельефа. Для более детального ответа на этот вопрос требуется накопить больше эмпирического материала по другим грядовым формам рельефа. При этом логнормальное распределение позволяет нам установить сходство строения рисунка в разных физико-географических условиях.

Наконец, обращает на себя внимание существование одновременно с логнормальным законом также гамма-распределение длин барханов показателями p -value 0.032 и 0.293 для участков “Сахара” и “Руб-Эль-Хали”. Практика одновременного совпадения с логнормальным и гамма распределением обловлена их схожестью при определенных значениях параметров распределений. Очевидно, в наблюдаемом случае участки с большими грядами “Сахара” и “Руб-Эль-Хали” обладают такими параметрами, что отличает их от участков параллельных барханов в Австралии.

Другой важной частью исследования математического строения параллельно-грядовых эоловых рисунков была проверка распределения числа особых морфологической структуры на соответствие закону Пуассона. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 1. Результаты расчетов на соответствие теоретическим статистическим распределениям длин барханов четырех эталонных участков

Участок	Показатель	Объем выборки	Среднее (м)	Показатель p -value			
				Нормальн.	Логнорм.	Гамма	Экспоненц.
“Сахара”	длины	95	46068	0.000	0.093	0.293	0.000
“Руб-Эль-Хали”	длины	128	45100	0.000	0.108	0.032	0.000
“Виктория”	длины	96	5340	0.000	0.372	0.000	0.000
“Симпсон”	длины	86	7092	0.000	0.576	0.000	0.000

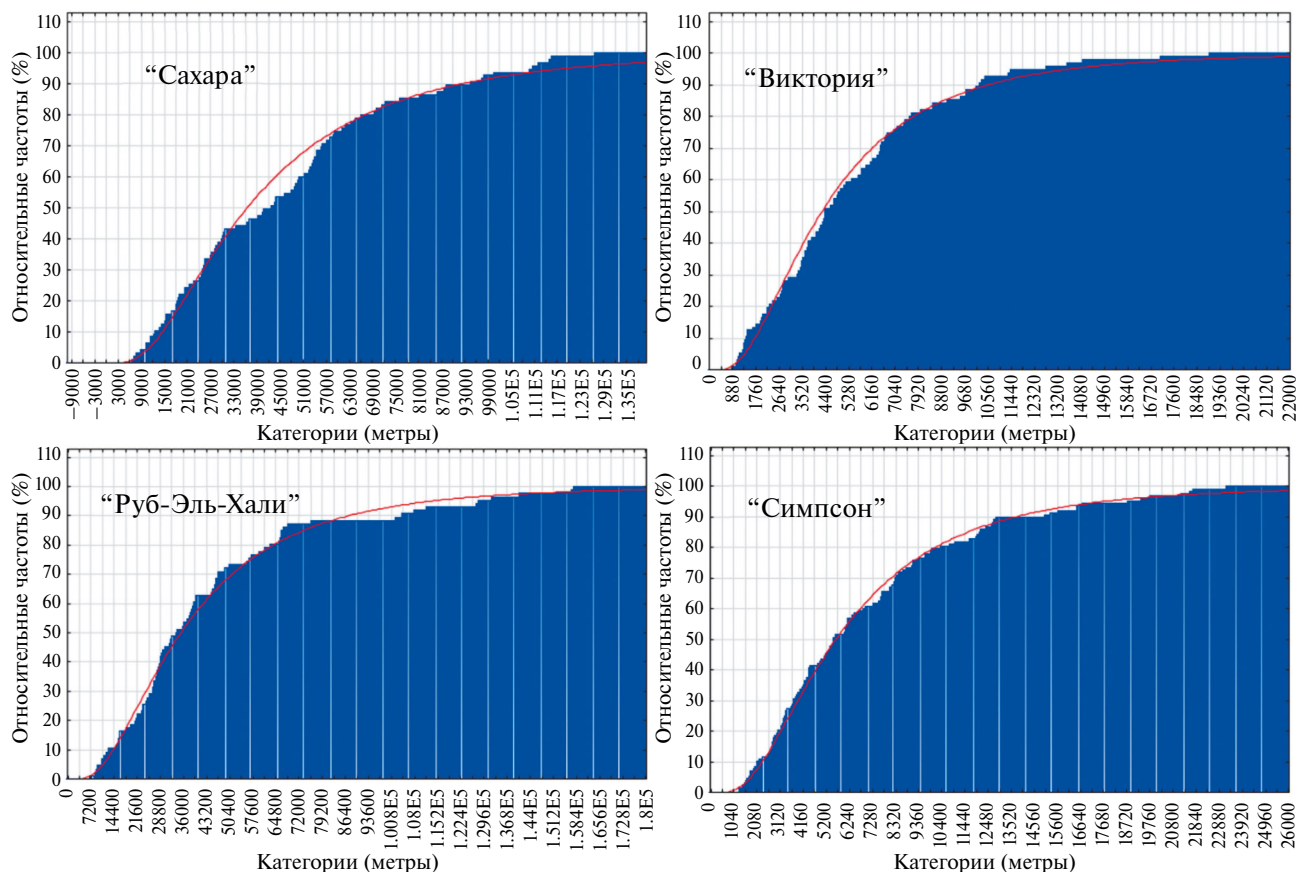


Рис. 8. Графики соответствия логнормальному распределению для длин барханов по накопленным частотам для четырех участков анализа.

Показатели в случае всех четырех участков варьируют в промежутках от 0.012 до 0.741, что превышает уровень значимости в 0.01 и дает право заявить, что закон Пуассона характерен почти для всех точек морфологической структуры для всех четырех участков. Исключение составляют только точки начал участка "Симпсон" при радиусах расчетных окружностей 1.5R и 2R и точки начал и примыканий участка "Руб-Эль-Хали" радиуса 2R. Закон Пуассона в свою очередь говорит об относительно высокой степени внутренней однородности и "правильности" рисунка, а также независимости возникновения барханов и динамики развития барханов друг от друга.

Продольный эоловый морфогенез образует уникальные ландшафтные рисунки, встречающиеся в крупных внутриконтинентальных пустынных экосистемах (Сахара, Аравийский п-ов, австралийские пустыни). Эти ландшафтные рисунки характеризуются правильным параллельным расположением барханов, для которых характерны очень большие длины (средние длины от 5 до 46 км в зависимости от участка), образуют обширные однородные эоловые поля. Локальные факторы протекания эолового процесса и его последующего закрепления отражаются в осо-

бенностях рисунка, но не отражаются в виде законов распределения морфометрических характеристик.

Проведенный анализ морфологических структур методами математической морфологии позволил выявить количественные закономерности (логнормальное распределение длин гряд и распределение Пуассона особых точек), которые характерны для всех объектов независимо от расположения. При этом локальные особенности строения выражены в различиях в параметрах распределений. Сопоставление с другими типами эоловых рисунков показало, что необходимо искать новые методы дифференциации их количественных закономерностей, так как существующие общие закономерности не позволяют отличить их друг от друга.

Общими выводами из проведенного исследования можно выделить:

1. Бимодальное действие ветров в разных физико-географических регионах создает ландшафтные рисунки, которые характеризуются едиными распределениями морфометрических показателей (логнормальное — для длин гряд и пуассоновское — для распределения особых точек).

Таблица 2. Результаты расчетов на соответствие статистическим распределениям длин барханов четырех эталонных участков

№ участка	Морфометрические характеристики	Объем выборки	Значение p-value на соответствие распределению Пуассона		
			R	1.5R	2R
“Сахара”	Точки начал гряд	95	0.173	0.332	0.081
	Точки примыкания гряд		0.531	0.510	0.129
	Точки окончания гряд		0.151	0.107	0.190
“Руб-Эль-Хали”	Точки начал гряд	128	0.043	0.288	0.004
	Точки примыкания гряд		0.609	0.187	0.001
	Точки окончания гряд		0.144	0.240	0.012
“Виктория”	Точки начал гряд	96	0.267	0.332	0.119
	Точки примыкания гряд		0.118	0.245	0.223
	Точки окончания гряд		0.278	0.100	0.460
“Симпсон”	Точки начал гряд	86	0.012	0.005	0.000
	Точки примыкания гряд		0.278	0.741	0.090
	Точки окончания гряд		0.409	0.115	0.050

2. В совокупности с современными методами моделирования эоловых процессов, полученные результаты могут послужить основой для новых подходов к изучению специфики уникальных эоловых ландшафтных рисунков.

3. Полученные закономерности могут быть использованы при решении различных экологических и инженерных задач: мониторинг рельефа и динамики природно-территориальных комплексов, прогноз развития эолового рельефа в условиях пустынь, количественная оценка поражения линейных сооружений эоловыми процессами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бричева С.С., Гонилов Т.В., Панин А.В. и др. О происхождении грядового рельефа Курайской котловины (юго-восточный Алтай) в свете морфометрических и георадарных исследований // Геоморфология. 2022. Т. 53. № 4. С. 25–41.
- Викторов А.С. Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука, 2006. 252 с.
- Гонилов 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.
- Федорович Б.А. Зональность эолового рельефообразования. Динамика и закономерности рельефообразования пустынь. М.: Наука, 1983. 236 с.
- Bristow C., Bailey S., Lancaster N. The sedimentary structure of linear sand dunes // Nature. 2000. V. 406. DOI: 10.1038/35017536.
- Folk R.L. Longitudinal Dunes of the Northwestern Edge of the Simpson Desert, Northern Territory, Australia, 1. Geomorphology and Grain Size Relationships // Sedimentology. 2006. V. 16. DOI: 10.1111/j.1365-3091.1971.tb00217.x.
- Guignier L., Niiya H., Nishimori H., Lague D., Valance A. Sand dunes as migrating strings // Physical Review. 2013. V. 87. № 5. DOI: 10.1103/PhysRevE.87.052206.
- Lancaster N. Aeolian features and processes // Geological Monitoring: Boulder, Colorado, Geological Society of America. 2009. P. 1–25.
- Lancaster N. Linear dunes // Progress in Physical Geography Earth and Environment. 1982. V. 6. № 4. DOI: 10.1177/030913338200600401.
- Livingstone I. New Models for the Formation of Linear Sand Dunes // Geography, 1988. V. 73. № 2. doi.org/10.1080/20436564.
- Rozier O., Narteau C., Gadal C., Claudin P., Courrech S. Elongation and stability of a linear dune // Geophysical Research Letters. 2019. V. 46. DOI: 10.48550/arXiv.1912.02722.
- Parteli E.J., Duran O., Tsoar H., Schwammle V., Herrmann H.J. Dune formation under bimodal winds // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2009. V. 106 (52). DOI: 10.1073/pnas.0808646106.
- Pell S.D., Chivas A.R., Williams I.S. Great Victoria Desert: development and sand provenance // Australian Journal of Earth Sciences. 1999. V. 46. DOI: 10.1046/j.1440-0952.1999.00699.x.
- Rubin D.M., Hesp P.A. Multiple origins of linear dunes on Earth and Titan // Nature Geoscience. 2009. V. 2. DOI: 10.1038/ngeo610.
- Tsoar H. Internal structure and surface geometry of longitudinal (seif) dunes // Journal of Sedimentary Research. 1982. V. 52. DOI: 10.1306/212F8062-2B24-11D7-8648000102C1865D.

Quantitative Regularities of the Morphological Structures Formed by the Linear Dunes Plains Based on Space Imagery

T. V. Gonikov¹, A. V. Zverev¹, S. M. Shadchinov², V. V. Gonikov³

¹*Institute of Geoecology named after E.M. Sergeev RAS, Moscow, Russia*

²*Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

³*Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia*

The work presents the results of a study of the structure of a landscape pattern formed by clusters of longitudinal (linear) dunes using methods of mathematical morphology of the landscape. Quantitative patterns of the distribution of the lengths of dunes (lognormal distribution) and the spatial distribution of the points of origin, termination and intersection of Aeolian forms (Poisson distribution) in different physical and geographical regions have been revealed. The similarity of the structure of the drawings with other types of Aeolian morphogenesis is indicated.

Keywords: aeolian processes, linear dunes, mathematical models, landscape pattern

REFERENCES

- Brichyova S.S., Gonikov T.V., Panin A.V., et al. O proiskhozhdenii gryadovogo rel'efa Kurajskoj kotloviny (yugo-vostochnyj Altaj) v svete morfometricheskikh i georadarnyh issledovanij [On the origin of the ridge relief of the Kurai basin (southeastern Altai) in the light of morphometric and GPR studies] // *Geomorfologiya*. 2022. V. 53. № 4. P. 25–41.
- Viktorov A.S. Osnovnye problemy matematicheskoy morfologii landshafta [The main problems of mathematical morphology of the landscape]. M.: Nauka, 2006. 252 p.
- Gonikov T.V., Viktorov A.S. Model' morfologicheskoy struktury gryadovykh eolovykh landshaftov, sformirovavshihya na osnove barhannykh cepej [Model of the morphological structure of ridge Aeolian landscapes formed on the basis of dune chains] // *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*. 2020. № 5. P. 32–39.
- Fedorovich B.A. Zonal'nost' eolovogo rel'efoobrazovaniya. Dinamika i zakonomernosti rel'efoobrazovaniya pustyn' [Zonality of Aeolian relief formation. Dynamics and patterns of desert relief formation]. M.: Nauka, 1983. 236 p.
- Bristow C., Bailey S., Lancaster N. The sedimentary structure of linear sand dunes // *Nature*. 2000. V. 406. DOI: 10.1038/35017536.
- Folk R.L. Longitudinal Dunes of the Northwestern Edge of the Simpson Desert, Northern Territory, Australia, 1. Geomorphology and Grain Size Relationships // *Sedimentology*. 2006. V. 16. DOI: 10.1111/j.1365-3091.1971.tb00217.x.
- Guignier L., Niiya H., Nishimori H., Lague D., Valance, A. Sand dunes as migrating strings // *Physical Review*. 2013. V. 87. № 5. DOI: 10.1103/PhysRevE.87.052206.
- Lancaster N. Aeolian features and processes // *Geological Monitoring: Boulder, Colorado, Geological Society of America*. 2009. P. 1–25.
- Lancaster N. Linear dunes // *Progress in Physical Geography Earth and Environment*. 1982. V. 6. № 4. DOI: 10.1177/030913338200600401.
- Livingstone I. New Models for the Formation of Linear Sand Dunes // *Geography*, 1988. V. 73. № 2. doi.org/10.1080/20436564.
- Rozier O., Narteau C., Gadal C., Claudin P., Courrech S. Elongation and stability of a linear dune // *Geophysical Research Letters*. 2019. V. 46. DOI: 10.48550/arXiv.1912.02722.
- Parteli E.J., Duran O., Tsoar H., Schwammle V., Herrmann H.J. Dune formation under bimodal winds // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2009. V. 106 (52). DOI: 10.1073/pnas.0808646106.
- Pell S.D., Chivas A.R., Williams I.S. Great Victoria Desert: development and sand provenance // *Australian Journal of Earth Sciences*. 1999. V. 46. DOI: 10.1046/j.1440-0952.1999.00699.x.
- Rubin D.M., Hesp P.A. Multiple origins of linear dunes on Earth and Titan // *Nature Geoscience*. 2009. V. 2. DOI: 10.1038/ngeo610.
- Tsoar H. Internal structure and surface geometry of longitudinal (seif) dunes // *Journal of Sedimentary Research*. 1982. V. 52. DOI: 10.1306/212F8062-2B24-11D7-8648000102C1865D.