

МОДЕЛИ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ И ГИДРОГЕОЛОГИИ

УДК 551.4.012

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ЭКЗОГЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОРФОЛОГИИ ЛАНДШАФТА

© 2023 г. А. С. Викторов^{1,*}, В. Н. Капралова¹, Т. В. Орлов¹

¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН)
Уланский пер. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

*E-mail: vic_as@mail.ru

Поступила в редакцию 27.09.2023 г.

После доработки 01.10.2023 г.

Принята к публикации 26.10.2023 г.

Цель статьи — показать целесообразность использования подходов математической морфологии ландшафта при анализе развития экзогенных геологических процессов (ЭГП). На примере эрозионно-термокарстовых равнин показано, что использование подходов математической морфологии ландшафта позволяет провести анализ развития территории в условиях взаимодействия нескольких ЭГП. Эрозионно-термокарстовые равнины отличаются сложным взаимодействием двух процессов — термокарста и термоэрозии, характеризующимися постоянной генерацией новых очагов термокарстовых процессов и уменьшением числа термокарстовых очагов при спуске озер термоэрозией, непрерывным изменением условий развития новых очагов термокарстовых процессов за счет трансформации основной поверхности в поверхность хасыреев. На основе математической модели морфологической структуры показано, что на каждом из двух типов поверхности в пределах эрозионно-термокарстовых равнин устанавливается динамическое равновесие в процессах возникновения, роста и спуска термокарстовых озер. На примере абразионных берегов в криолитозоне показано, что использование подходов математической морфологии ландшафта позволяет провести анализ комплекса процессов развития термоцирков в условиях сложного взаимодействия их очагов. Показано, что в условиях относительного однородного по геологическим и геокриологическим условиям абразионного склона устанавливается динамическое равновесие, характеризующееся стабилизацией двух параметров: средней плотности расположения термоцирков и вероятностного распределения размеров термоцирков по простиранию склона. Получены: аналитическая зависимость между вероятностными распределениями размеров хорд образующихся молодых оползней и хорд всех представленных оползней, в том числе частично стертых более поздними оползнями, и зависимость между средней плотностью расположения оползней вдоль береговой линии и параметрами распределения размеров хорд образующихся молодых оползней. Закономерности были проверены на ряде участков на основе данных дистанционного зондирования.

Ключевые слова: математическая морфология ландшафта, термокарст, эрозионно-термокарстовые равнины, термоцирки, криолитозона

DOI: 10.31857/S0869780923060085, EDN: ZGOMEN

ВВЕДЕНИЕ

Значительное количество исследований посвящено развитию экзогенных геологических процессов (ЭГП) на основе анализа, как современного состояния, так и ретроспективного анализа, а также прогностических построений.

Так, в большом количестве исследований затрагивается изучение термокарстовых процессов, при этом одним из возможных вариантов является моделирование термокарстовых процессов [8, 10, 12, 17–19]. Однако полноценное моделирование термодинамических процессов с учетом фазовых переходов отличается значительной сложностью.

Многие исследования посвящены исследованию оползневых процессов, при этом обширная группа работ из них — в связи с отступанием берегов в зоне развития многолетнемерзлых пород [9, 13–15]. В большом числе работ излагаются результаты изучения карстовых процессов (например, [1]), в том числе на основе вероятностных подходов [11]. Значительное количество исследований посвящено и другим видам экзогенных процессов (эоловым, эрозионным, просадочно-суффозионным и др.).

Однако выполненные исследования в значительной части характеризуются следующими особенностями:

- изучение влияния отдельных характеристик геологических условий на особенности процесса при значительно меньшем внимании, уделяемом общим особенностям протекания процесса в самых разных условиях;

- ограниченность использования количественных приемов при анализе развития ЭГП;

- преимущественно детерминированный подход при постановке и решении задач анализа процессов;

- относительно слабый учет взаимодействия различных процессов и разных очагов одного и того же процесса.

Представляется возможным, что продвижение в решении перечисленных проблем может быть частично осуществлено при использовании подходов математической морфологии ландшафта. Математической морфологией ландшафта называют направление ландшафтоведения, исследующее количественные закономерности построения мозаик (ландшафтных рисунков), образованных на земной поверхности природно-территориальными комплексами, и методы их математического анализа. Рассматриваемое направление возникло в российской науке о ландшафте в 1990-е годы [2–5, 7] и развивалось до настоящего времени, расширяя спектр охватываемых задач. В зарубежной географии направление с аналогичным названием стало развиваться только 2010-е годы, но оно по содержанию резко отличается от российского направления и относится не к науке о ландшафте, а к геоморфологии, не имея ничего общего по подходам к решению задач [16].

Ядром математической морфологии ландшафта являются математические модели ландшафтных рисунков, с которым связано ее обособление, и которое придает целостность рассматриваемому направлению, именно оно является общей основой решения многих разнообразных задач [2, 3]. Наиболее перспективный подход для развития математической морфологии ландшафта, как показали исследования, — использование теории случайных процессов. В настоящее время создан некоторый комплекс канонических математических моделей морфологических структур — математические модели морфологических структур территорий с широким развитием карстовых и просадочно-суффозионных процессов, аллювиальных равнин, эрозионных равнин, озерно-термокарстовых равнин, заболоченных и солончаковых равнин, ландшафтов с широким развитием оползневых процессов и ряда других.

Целью настоящей работы является показать целесообразность использования подходов математической морфологии ландшафта при анализе развития экзогенных геологических процессов.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Базой для использования математической морфологии ландшафта при анализе развития ЭГП является то, что очаги ряда процессов одновременно представляют собой природно-территориальные комплексы и соответственно являются частью соответствующего ландшафтного рисунка рассматриваемой территории. Таким образом, данные закономерности и другая информация о ландшафтном рисунке одновременно могут быть интерпретированы при анализе расположения, размеров, времени возникновения и развития очагов, соответствующих ЭГП.

Подходы математической морфологии ландшафта позволяют вести анализ сложных ситуаций и учитывать многофакторность на основе вероятностного анализа, нередко делая акцент на выделении общих закономерностей развития ЭГП. Так, использование подходов математической морфологии ландшафта позволяет провести анализ развития территории в сложных условиях взаимодействия нескольких процессов или их комплексов. Покажем это на примере анализа развития процессов на эрозионно-термокарстовых равнинах и процессов формирования и развития термоцирков в криолитозоне.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Эрозионно-термокарстовые равнины представляют собой волнистые или слабохолмистые поверхности с тундровой или лесотундровой растительностью с вкраплением термокарстовых озер и хасыреев и развитием эрозионных форм. Озера и хасыреи имеют, как правило, округлые очертания и в беспорядке расположены в пределах равнины. Типичное изображение эрозионно-термокарстовых равнин на материалах космической съемки приведено на рис. 1.

Развитие эрозионно-термокарстовых равнин происходит под воздействием комплекса разнонаправленных процессов:

- возникновение первичных термокарстовых понижений с водой (очаг термокарстового процесса),

- рост понижений (озер) под действием термоабразионных процессов,

- спуск озер эрозионными процессами с остановкой их роста,

- появление хасыреев за счет спуска озер.

Анализ материалов космических съемок показал, что в пределах эрозионно-термокарстовых равнин можно выделить два главных элемента:

- волнистые или слабохолмистые водораздельные поверхности с тундровой или лесотундровой растительностью (“основная поверхность”),

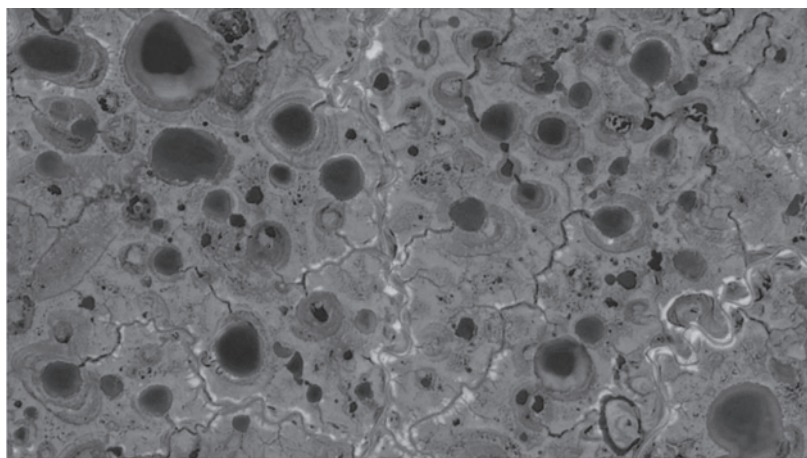


Рис. 1. Типичное изображение участка эрозионно-термокарстовой равнины на материалах космической съемки.

— пониженные поверхности, занятые хасыреями, которые нередко сливаются друг с другом, образуя массивы.

Появление и рост термокарстовых озер происходит как в пределах основной поверхности, так и, как показал анализ материалов космических съемок, в пределах площади хасыреев и их массивов (вторичные озера). Вторичные озера отличаются несовпадением центра озера и центра хасырея, четкими очертаниями и тоже часто округлой формой. Кроме того, в хасыреях встречаются остаточные озера, сформировавшиеся в результате незавершенного спуска водной массы озера в процессе превращения в хасырей (рис. 2), они характеризуются расплывчатыми неправильными очертаниями и нерезкими границами.

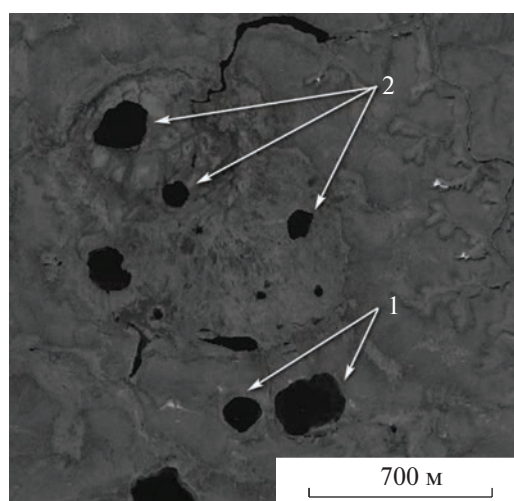


Рис. 2. Изображения различных типов термокарстовых озер на материалах космической съемки: озер на основной поверхности (1) и вторичных озер на поверхности хасыреев (2).

Таким образом, для территории характерно сложное взаимодействие двух процессов — термокарста и термоэрозии, характеризующееся следующими элементами:

- постоянная генерация новых очагов термокарстовых процессов,
- постоянное уменьшение числа термокарстовых очагов при спуске озер термоэрозией,
- постоянное изменение условий развития новых очагов термокарстовых процессов за счет трансформации основной поверхности в поверхность хасыреев.

Дополнительную сложность придает то, что новые термокарстовые понижения не возникают в пределах площади существующих озер, поэтому, чем больше заозеренность, тем меньше в этот момент генерируется новых первичных термокарстовых понижений.

Анализ развития территории может быть выполнен на основе математической модели морфологической структуры, базирующейся на следующих допущениях [6]:

1) возникновения первичных термокарстовых понижений (озер) на основной поверхности и на поверхности хасыреев за непересекающиеся отрезки времени (Δt) и на непересекающихся площадках (Δs) являются независимыми случайными событиями; вероятность возникновения понижения зависит только от величины отрезка и площадки¹.

$$p_1 = \lambda_i \Delta s \Delta t + o(\Delta s \Delta t), \quad i = 0, 1,$$

$$p_k = o(\Delta s \Delta t), \quad k = 2, 3, \dots,$$

¹ Для малых площадок и временных отрезков вероятность возникновения одного понижения много больше, чем вероятность возникновения нескольких понижений.



Рис. 3. Схема расположения ключевых участков.

где λ_0 и λ_1 — значения плотности генерации новых первичных термокарстовых понижений для свободной поверхности и поверхности хасыреев соответственно;

2) возникновение первичных термокарстовых понижений не происходит на площади существующих термокарстовых озер;

3) радиус возникшего термокарстового понижения, как функция времени, представляет собой случайный процесс; изменение радиуса происходит независимо от других озер, и его скорость пропорциональна плотности тепловых потерь через боковую поверхность озерной котловины;

4) в процессе роста озеро может перейти в хасырей при его спуске эрозионной сетью, вероятность этого не зависит от других озер; при этом рост озера прекращается;

5) возникновения истоков эрозионных форм на непересекающихся площадках являются независимыми случайными событиями со средней плотностью расположения истоков γ_0 и γ_1 для свободной поверхности и хасыреев соответственно; вероятность наличия истока для пробной площадки зависит только от ее величины².

Проведенный математический анализ модели [6] позволяет получить следующие выводы об особенностях развития комплекса ЭГП на рассматриваемом типе территории.

Разработанный вариант модели показывает существование динамического равновесия в развитии ЭГП, прежде всего, в возникновении, росте и спуске термокарстовых озер. Оно характеризуется стабилизацией при значительном времени развития таких параметров, как плотность

расположения термокарстовых очагов и распределения площади термокарстового очага; последние в условиях динамического равновесия отвечают интегрально-экспоненциальным распределениям отдельно на основной поверхности и поверхности хасыреев с функцией плотности распределения

$$f_i(x, \infty) = -\frac{1}{xEi(-\gamma_i \varepsilon_i)} e^{-\gamma_i x},$$

$$x \geq \varepsilon_i, \quad i = 0, 1,$$

где $\varepsilon_0, \varepsilon_1$ — начальный размер озера соответственно для основной поверхности и поверхности хасыреев, γ_0, γ_1 — средняя плотность расположения истоков эрозионных форм соответственно для свободной поверхности и поверхности хасыреев, $Ei(-x)$ — интегрально-экспоненциальная функция.

При этом интегрально-экспоненциальные распределения, относящиеся к озерам основной поверхности, и к озерам, относящимся к хасыреям, для одного и того же участка в общем случае различаются по значениям основного параметра гамма. Эту разницу можно объяснить разной плотностью эрозионной сети на рассматриваемых двух типах поверхностей. Выводы подтверждаются статистическим анализом на 8 участках, расположенных в различных физико-географических условиях [6] (рис. 3); примеры распределений приведены на рис. 4.

Использование подходов математической морфологии ландшафта позволяет провести анализ развития территории в сложных условиях взаимодействия очагов комплексов различных процессов. Покажем это на примере анализа развития процессов формирования и развития термоцирков в криолитозоне.

² Для малых площадок много больше, чем вероятность наличия более чем одного истока.

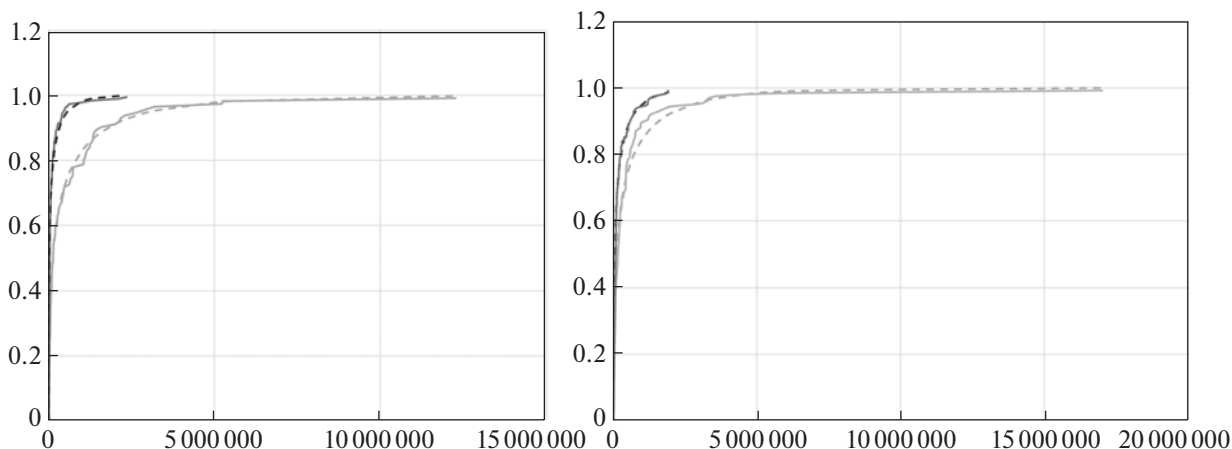


Рис. 4. Примеры графиков распределения площадей термокарстовых озер на участках 22 (слева) и 28 (справа); по оси x даны площади озер (м^2), по оси y – вероятность; черные линии – графики озер, возникших на поверхности массивов хасыреев, серые – на основной поверхности; сплошные линии – эмпирические распределения площадей, штриховые – теоретические интегрально-экспоненциальные.



Рис. 5. Типичное изображение абразионных берегов с развитием оползневых процессов в криолитозоне на материалах космической съемки.

Рассматриваемые участки представляют собой сочетание циркуобразных фрагментов (термоцирков) с развитием оползней разного возраста, как правило, с наличием обрывистого участка в нижней части склона, с развитием интенсивных термоабразионных и термоденудационных процессов. Местами на склоне наблюдаются дугообразные остаточные участки водораздельной поверхности, отвечающие различным стадиям оползания. Нередко на склоне развита эрозия. Таким образом, наблюдается сложный комплекс

процессов (особенно значимым из которых является оползневой), которые формируют термоцирк, представляющий собой своеобразный комплексный очаг ЭГП. Типичный вид участка абразионного берега представлен на рис. 5.

Характерная особенность верхней части оползней на границе с прилегающей водораздельной поверхностью – наличие дуг, ограничивающих оползневое тело и являющихся одновременно его границей с водораздельной поверхностью. Не-

сколько схематизируя, главные морфологические особенности оползневого тела в рассматриваемой области описываются, прежде всего, длиной хорды, которая соединяет концы дуги и длиной дуги, которая в значительной мере коррелирует с длиной хорды.

При развитии на склоне происходят следующие основные процессы:

- формирование нового оползневого тела (термоцирка) и соответствующих дуг и хорд,
- стирание части старых (уже существующих) термоцирков и оползневых тел с коррекцией соответствующих дуг и хорд,
- исчезновение термоцирка и оползневого тела и, соответственно, его дуги и хорды в случае полного стирания новым оползневым телом.

Таким образом, наблюдается сложная стохастическая картина взаимодействия комплексных очагов процессов (термоцирков) с частичным или полным стиранием уже существующих очагов с появлением новых, которые в свою очередь становятся объектом дальнейшего стирания.

Анализ развития ЭГП на подобной территории может быть выполнен на основе математической модели морфологической структуры берега, основным элементом которой являются термоцирки [4]. Модель базируется на следующих допущениях:

1) вероятность появления новых дуг (в количестве $k = 1, 2, \dots$) $p_k(\Delta l, \Delta t)$ за время Δt с центральной точкой на отрезке береговой линии Δl определяется только величинами временного интервала и отрезка³

$$p_1(\Delta\lambda, \Delta t) = \lambda \Delta\lambda \Delta t + o(\Delta\lambda \Delta t),$$

$$p_k(\Delta\lambda, \Delta t) = o(\Delta\lambda \Delta t), \quad k > 1;$$

2) хорды дуг возникающих оползней имеют постоянное распределение $F_0(x)$.

Математический анализ модели позволил получить следующие выводы [4].

В условиях относительного однородного по геологическим и геокриологическим условиям абразионного склона устанавливается динамическое равновесие, которое характеризуется стабилизацией двух характеристик:

- средней плотности расположения термоцирков,
- вероятностного распределения размеров термоцирков по простиранию склона.

³ При этом вероятность появления более одного оползня (дуги) с центральной точкой на этом отрезке за этот же временной интервал много меньше, чем вероятность появления одного.

В процессе анализа модели получены:

– аналитическая зависимость между вероятностным распределением размеров хорд образующихся молодых оползней и вероятностным распределением хорд всех представленных оползней, в том числе частично стертых более поздними оползнями:

$$f_t(x) = \frac{f_0(y) + \frac{4M\xi_0}{M^2\xi_0} [1 - F_0(y)]}{1 + \frac{4(M\xi_0)^2}{M^2\xi_0}},$$

где $M\xi_0, M^2\xi_0$ – математическое ожидание и момент второго порядка размеров хорды образовавшегося молодого оползня соответственно,

– зависимость между средней плотностью расположения оползней вдоль береговой линии и параметрами распределения размеров хорд образующихся молодых оползней:

$$\gamma^{(\infty)} = \frac{2}{M\xi_0} \left[1 + \frac{4(M\xi_0)^2}{M^2\xi_0} \right].$$

Кроме математического анализа были выполнены эмпирические исследования длин хорд оползней на конкретных участках, включающие получение выборок длин хорд для оползней каждого участка и их сопоставление с теоретическими распределениями для выявления характерных особенностей распределений⁴.

Выбор ключевых участков выполнен на основе требований относительной морфологической однородности участка и однородности физико-географических, прежде всего геолого-геоморфологических условий. В итоге было выбрано 12 участков протяженностью 2.5–10.1 км, имеющих в целом прямолинейное простирание (рис. 6) и расположенных в пределах береговой линии полуостровов Канин нос и Ямал, острова Колгуев, Хайпудырской губы.

Результаты статистической обработки по всем участкам приведены в табл. 1.

Анализ сходства эмпирических распределений длин хорд, стрелок, радиусов кривизны с различными видами теоретических распределений (нормальное, логнормальное, гамма-распределение и экспоненциальное) дает интересные результаты. На всех участках на уровне значимости 0.99 наблюдается один и тот же тип распределения – логнормальное. Это выполняется при значительной разнице значений параметров распределения. Гамма распределение также соот-

⁴ Выполнено совместно с М.В. Архиповой, В.В. Бондарь, Т.В. Гониковым.

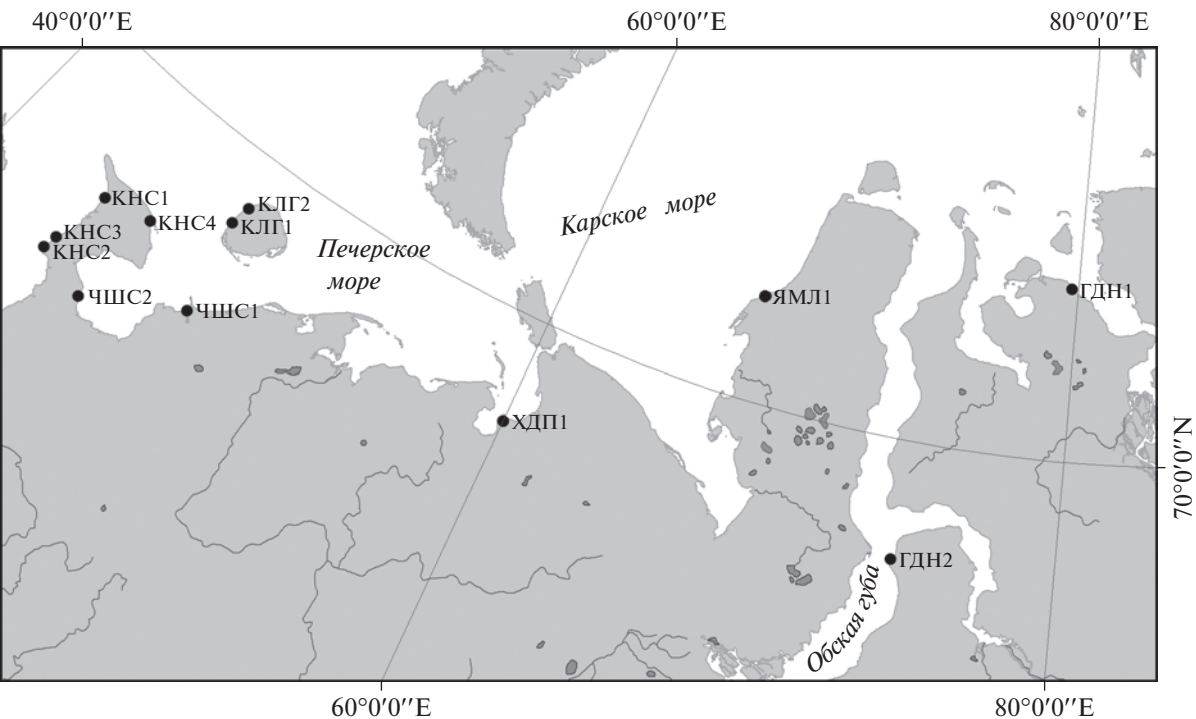


Рис. 6. Схема расположения ключевых участков.

ветствует эмпирическим данным, но несколько хуже. Нормальное распределение не согласуется с эмпирическими данными ни на одном участке.

На рис. 7 показаны примеры соответствия эмпирических распределений и теоретических логнормальных распределений.

Таблица 1. Результаты статистической обработки данных по выборкам длин хорд оползней на ключевых участках

Участок	Объем выборки	Нормальное распределение			Логнормальное распределение			Гамма-распределение		
		среднее	стандарт	p	среднее логарифма	стандарт логарифма	p	λ	α	p
КНС1	183	50.3	43.2	0.000	3.675	0.666	0.288	22.66	2.22	0.015
КНС2	181	59.6	43.0	0.000	3.881	0.639	0.241	23.18	2.57	0.010
КНС3	181	22.8	15.1	0.000	2.951	0.586	0.782	7.63	2.99	0.131
КНС4	159	45.6	27.1	0.000	3.678	0.529	0.339	12.40	3.68	0.153
ЯМЛ1	108	18.0	11.3	0.000	2.751	0.504	0.574	4.71	3.81	0.314
КЛГ1	113	24.12	89.12	0.057	3.108	0.156	0.254	3.51	6.87	0.331
КЛГ2	108	25.49	104.96	0.02	3.16	0.151	0.923	3.74	6.80	0.64
ХПД1	111	30.77	118.3	0.309	3.36	0.14	0.694	3.93	7.82	0.842
ЧШС1	290	22.58	114.93	0	3.004	0.235	0.015	4.91	4.60	0.037
ЧШС2	278	14.83	99.96	0	2.532	0.312	0.545	4.622	3.21	0.113
ГДН1	190	14.29	40.116	0	2.564	0.195	0.658	2.637	5.42	0.305
ГДН2	319	21.55	343.64	0	2.832	0.449	0.235	9.56	2.25	0.006

Примечание. λ – масштабный параметр, α – параметр формы, p – параметр согласия распределений (разница эмпирического и теоретического распределений статистически значима на уровне 0.99 в случае $p < 0.01$).

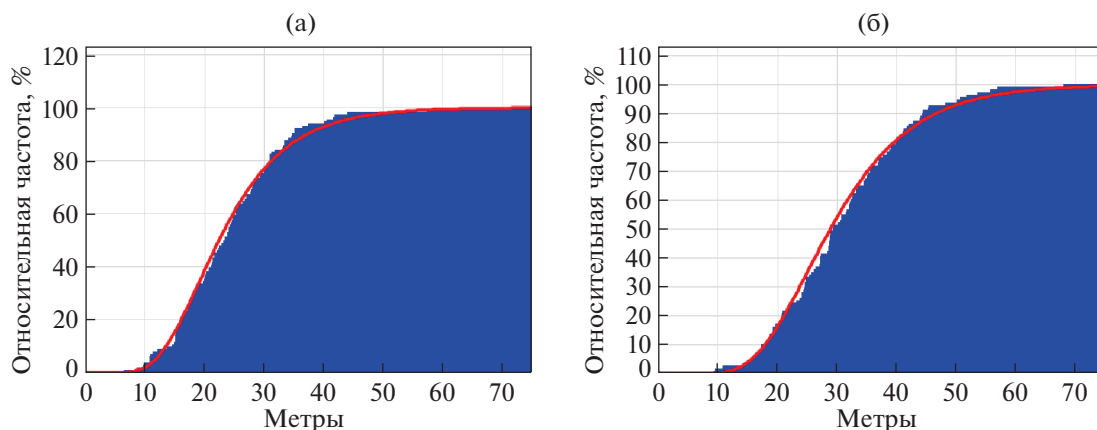


Рис. 7. Пример соответствия эмпирических распределений (синий контур) и теоретических (красная линия) логнормальных распределений по ключевым участкам (а – КНС1, б – КНС2).

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование позволяет получить следующие выводы.

Применение подходов математической морфологии ландшафта основывается на анализе ландшафтных рисунков, элементами которых являются природно-территориальные комплексы, отвечающие очагам экзогенных геологических процессов.

Использование подходов математической морфологии ландшафта базируется на количественном анализе ситуаций на основе вероятностных моделей, прежде всего теории случайных процессов.

Применение подходов математической морфологии ландшафта позволяет проводить анализ сложных ситуаций в развитии экзогенных геологических процессов; в частности, к ним относятся случаи сложного взаимодействия процессов с формированием противоположных тенденций, случаи возникновения динамического равновесия в развитии процессов, случаи сложного взаимодействия различных возникающих очагов процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аникеев А.В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. М.: РУДН, 2017. 328 с.
2. Викторов А.С. Математическая морфология ландшафта. М: Тратек, 1998. 220 с.
3. Викторов А.С. Математические модели ландшафтных рисунков // Изв. ВГО. Т. 124. Вып. 1. 1992. С. 75–83.
4. Викторов А.С. Моделирование морфологических особенностей абразионных берегов с развитием оползневых процессов в криолитозоне // Геоэкология. 2022. № 6. С. 28–36.
5. Викторов А.С. Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука, 2006. 252 с.
6. 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. 58–69.
7. Викторов А.С., Капралова В.Н., Орлов Т.В., Трапезникова О.Н. и др. Математическая морфология ландшафтов криолитозоны. 2016. М.: РУДН, 232 с.
8. Мельников В.П., Хименков А.Н., Брушков А.В. и др. Криогенные геосистемы: проблемы исследования и моделирования. Новосибирск Академ. Изд-во ГЕО, 2010 390 с.
9. Новиков В.Н., Федорова Е.В. Разрушение берегов в юго-восточной части Баренцева моря // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 1989. № 1. С. 64–68.
10. Перльштейн Г.З., Павлов А.В., Левашов А.В., Сергеев Д.О. Нетемпературные факторы теплообмена деятельного слоя с атмосферой // Матер. третьей конференции геокриологов России, Москва, 1–3 июня 2005 г. Т. 1. М.: МГУ, 2005. С. 86–91.
11. Толмачев В.В. Вероятностный подход при оценке устойчивости закарстованных территорий и проектировании противокарстовых мероприятий // Инженерная геология. 1980. № 3. С. 98–107.
12. Шур Ю.Л. Термокарст (к теплофизическим основам учения о закономерностях развития процесса). М.: Недра, 1977. 80 с.
13. Aleksyutina D.M., Shabanova N.N., Kokin O.V., Vergun A.P. et al. Monitoring and modelling issues of the thermoabrasive coastal dynamics // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2018. № 193. № 012003.
14. Belova N.G., Shabanova N.N., Ogorodov S.A., Kamalov A.M. et al. Erosion of permafrost coasts of Kara sea near kharasavey cape, Western Yamal // Earth's Cryosphere. 2017. Т. 21. № 6. С. 73–83.
15. Belova N.G., Novikova A.V., Günther F., Shabanova N.N. Spatiotemporal variability of coastal retreat rates at Western Yamal Peninsula, Russia, based on re-

- motely sensed data // J. of Coastal Research. 2020. № 95. P. 367–371.
16. *Daya Sagar B. S.* Mathematical Morphology in Geomorphology and GISci. CRC Press, Boca Raton, FL, 2013. 546 p.
 17. *Ling F., Zhang T.* Numerical simulation of permafrost thermal regime and talik development under shallow thaw lakes on the Alaskan Arctic Coastal Plain // J. of Geophysical Research. 2003. 108. 4511. <https://doi.org/10.1029/2002JD003014>
 18. *Ling F., Wu Q., Zhang T., Niu F.* Modelling Open-Talik Formation and Permafrost Lateral Thaw under a Thermokarst Lake, Beiluhe Basin, Qinghai-Tibet Plateau // Permafrost and Periglac. Process., 2012. V. 23. № 4. P. 312–321. <https://doi.org/10.1002/ppp.1754>
 19. *Romanovskii N.N., Hubberten H.-W.* Results of permafrost modelling of the lowlands and shelf of the Laptev Sea Region // Permafrost and Periglac. Process., 2001. V. 12. № 2. P. 191–202. <https://doi.org/10.1002/ppp.387>

ANALYSIS OF THE EXOGENOUS GEOLOGICAL PROCESS DEVELOPMENT BASED ON THE MODELS OF THE MATHEMATICAL MORPHOLOGY OF LANDSCAPES

A. S. Viktorov^{a, #}, V. N. Kapralova^a, and T. V. Orlov^a

^a*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,
Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

[#]*E-mail: vic_as@mail.ru*

The paper aims to show the efficiency of applying the approaches used in the mathematical morphology of landscapes to the analysis of exogenous geological process development. Taking thermokarst plains with fluvial erosion as an example, it is shown that the approaches of the mathematical morphology of landscapes permit analyzing the terrain development under complex conditions of several interacting exogenous geological processes. Thermokarst areas develop under the impact of two interacting processes, i.e., thermokarst and fluvial thermoerosion. They include the following stages: constant generation of new thermokarst foci, constant decrease in the number of the thermokarst foci, when lakes are drained by thermoerosion, constant change in the conditions for the development of new thermokarst foci due to the transformation of the main surface into the khasyrei surface. The approaches of the mathematical morphology of landscapes revealed that each of the two types of surface within the thermokarst plains with fluvial erosion reached a dynamic balance upon the emergence, growth, and drainage of thermokarst lakes. Taking the formation and development of thermal cirques on abrasion shores within the permafrost zone as an example, it is shown that the approaches of the mathematical morphology of landscapes make it possible to analyze a set of processes for thermal cirques development under complex interaction of their foci. Based on the analysis of the mathematical model of the formation and development of thermal cirques, it is shown that in conditions of an abrasion slope that is relatively homogeneous in terms of geological and geocryological conditions, a dynamic balance is reached. It is characterized by stabilizing two parameters: the average density of thermal cirques and the probabilistic distribution of the thermal cirque size along the slope strike. An analytical relationship was obtained between the probabilistic distributions of chord sizes of the forming young landslides and all presented landslides, including partly erased ones by the later landslides; and the relationship between the average statistical forms of landslides along the coastline and the distribution parameters of the chord sizes of the forming young landslides. The obtained regularities were tested at several sites based on remote sensing data.

Keywords: *mathematical morphology of landscape, thermokarst, erosional and thermokarst plains, thermal cirques, permafrost zone*

REFERENCES

1. Anikeev, A.V. [Collapses and sinkholes in karst areas: mechanisms of formation, prediction and risk assessment]. Moscow, RUDN Publ., 2017, 328 p. (in Russian)
2. Viktorov, A.S. [Mathematical morphology of landscape]. Moscow, Tratek Publ., 1998, 220 p. (in Russian)
3. Viktorov, A.S. [Mathematical models of landscape patterns]. *Izvestiya VGO*, vol. 124, no. 1, 1992, pp. 75–83. (in Russian)
4. Viktorov, A.S. [Modeling of morphological features of abrasive shores with the development of landslide processes in the cryolithozone]. *Geokologiya*, 2022, no. 6, pp. 28–36. (in Russian)
5. Viktorov, A.S. [General problems of the mathematical morphology of landscapes]. Moscow, Nauka Publ., 2006, 252 p. (in Russian)
6. Viktorov, A.S., Kapralova, V.N., Orlov, T.V. [Development of a model of the morphological structure of erosion-thermokarst plains based on the use of space survey materials]. *Issledovanie Zemli is kosmosa*, 2023, no. 3, pp. 58–69. (in Russian)
7. Viktorov, A.S., Kapralova, V.N., Orlov, T.V., Trapeznikova, O.N. et al. [Mathematical morphology of per-

- mafrost landscapes]. Moscow, RUDN Publ., 2016, 232 p. (in Russian)
8. Melnikov, V.P., Khimenkov, A.N., Brushkov, A.V. et al. [Cryogenic geosystems: problems of research and modeling]. Novosibirsk, GEO Academic Publ., 2010, 390 p. (in Russian)
 9. Novikov, V.N., Fedorova, E.V. [Coastal destruction in the southeastern part of the Barents Sea]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5: geografiya*, 1989, no. 1, pp. 64–68. (in Russian)
 10. Perlshtein, G.Z., Pavlov, A.V., Levashov, A.V., Sergeev, D.O. [Non-temperature factors of heat exchange between the active layer and the atmosphere]. Proc. the Third Conference of Geocryologists of Russia, Moscow, June 1–3, 2005, Moscow, MGU Publ., 2005, vol. 1, pp. 86–91. (in Russian)
 11. Tolmachev, V.V. [Probabilistic approach in assessing stability of karst territories and designing anti-karst measures]. *Inzhenernaya geologiya*, 1980, no. 3, pp. 98–107. (in Russian)
 12. Shur, Yu.L. [Thermokarst (thermophysical foundations of the process development laws)]. Moscow, Nedra Publ., 1977, 80 p. (in Russian)
 13. Alekseyutina, D.M., Shabanova, N.N., Kokin, O.V., Vergun, A.P., et al. Monitoring and modelling issues of the thermoabrasive coastal dynamics. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2018, iss. 193, no. 012003.
 14. Belova, N.G., Novikova, A.V., Günther, F., Shabanova, N.N. Spatiotemporal variability of coastal retreat rates at Western Yamal Peninsula, Russia, based on remotely sensed data. *J. of Coastal Research*, 2020, no. 95, pp. 367–371.
 15. Belova, N.G., Shabanova, N.N., Ogorodov, S.A., Kamalov, A.M. et al. Erosion of permafrost coasts of Kara Sea near Kharasavey Cape, Western Yamal. *Earth's Cryosphere*. 2017, vol. 21, no. 6, pp. 73–83.
 16. Daya Sagar, B.S. Mathematical morphology in geomorphology and GISci. CRC Press, Boca Raton, FL, 2013, 546 p.
 17. Ling, F., Zhang, T. Numerical simulation of permafrost thermal regime and talik development under shallow thaw lakes on the Alaskan Arctic Coastal Plain. *J. Geophys. Res.*, 2003, no. 108, p. 4511. <https://doi.org/10.1029/2002JD003014>
 18. Ling, F., Wu, Q., Zhang, T., Niu, F. Modelling open-talik formation and permafrost lateral thaw under a thermokarst lake, Beiluhe Basin, Qinghai-Tibet Plateau. *Permafrost and Periglac. Processes*, 2012, vol. 23, no. 4, pp. 312–321. <https://doi.org/10.1002/ppp.1754>
 19. Romanovskii, N.N., Hubberten, H.-W. Results of permafrost modelling of the lowlands and shelf of the Laptev Sea region. *Permafrost and Periglac. Processes*, 2001, vol. 12, no. 2, pp. 191–202. <https://doi.org/10.1002/ppp.387>