
ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 551.4.042

ОТРАЖЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКЗОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОКАЗАТЕЛЯХ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ЛАНДШАФТОВ

© 2021 г. А. С. Викторов^{1,*}, Т. В. Орлов¹, В. Н. Капралова¹

¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

*E-mail: dist@geoenv.ru

Поступила в редакцию 15.12.2020 г.

После доработки 25.12.2020 г.

Принята к публикации 19.01.2021 г.

Проблема установления взаимосвязей характеристик идущих в ландшафте процессов и его современного облика решалась различными исследователями при индикации процессов, в инженерно-геологических изысканиях и разнообразных ландшафтных исследованиях, когда ставилась и решалась задача отражения процессов во внешнем облике ландшафта. Однако количественный аспект подобных задач как правило не рассматривался. Цель статьи — показать взаимосвязи динамических характеристик экзогенных геологических процессов и количественных показателей морфологической структуры ландшафтов (ландшафтных метрик) одного временного среза, а также факторы их определяющие. Исследования выполнялись на примере одного из наиболее распространенных ландшафтов криолитозоны — эрозионно-термокарстовых равнин. Решение поставленной задачи получено на основании подходов математической морфологии ландшафтов на базе математических моделей морфологической структуры. Выявлены взаимосвязи количественных параметров динамики термокарстовых процессов в пределах эрозионно-термокарстовых равнин — соотношение скоростей генерации новых термокарстовых понижений, с одной стороны, и роста их размеров или дисперсии размеров, с другой, и количественных характеристик морфологической структур. На базе значений метрик, присущих ландшафтам в настоящий момент времени, получены конкретные выражения для параметров динамики термокарстовых процессов, которые по сути являются количественными индикаторами динамических параметров. Данный вывод прошел первичную апробацию в виде определения значений рассматриваемого параметра двумя разными способами. Установленные взаимосвязи являются общими для рассматриваемого рода ландшафта (эрозионно-термокарстовые равнины), но зависят от характера развития процесса (синхронный старт и асинхронный старт) и могут послужить основой для определения необходимых для прогноза и оценки рисков значений динамических параметров процессов без стационарных наблюдений.

Ключевые слова: математическая морфология ландшафта, математические модели морфологических структур, ландшафт, эрозионно-термокарстовая равнина, индикация и отражение процессов

DOI: 10.31857/S0869780921020107

ВВЕДЕНИЕ

Задача исследования взаимосвязей характеристик процессов, формирующих ландшафт, и морфологических показателей его современного облика решалась различными исследователями. Так одной из ветвей ландшафтной индикации является индикация природных процессов. В индикационной постановке ставились задачи выявления текущего процесса при однократном исследовании, определения стадий процесса, индикации завершившихся процессов (ретроиндикация) и индикации прогнозных оценок процессов [4–6 и др.]. В разнообразных ландшафтных исследованиях ставилась и решалась задача отражения процессов во внешнем облике ландшафта [7 и др.]. Про-

водились многочисленные исследования ландшафтных метрик, но они не были связаны с вопросом определения динамических параметров процессов [8].

В то же время количественный аспект подобных задач как правило не исследовался. Однако вопрос о наличии взаимосвязи количественных характеристик процессов, развивающихся в пределах того или иного ландшафта, и его количественных характеристик в настоящий момент времени представляет значительный интерес. При этом возникают вопросы о реальности подобных связей, механизме их реализации, степени варьирования таких связей при изменении

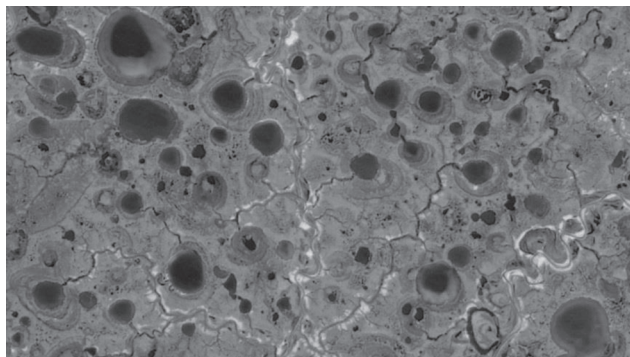


Рис. 1. Пример изображений ландшафта эрозионно-термокарстовой равнины на материалах космической съемки.

физико-географических условий и других факторов.

Цель настоящей статьи — показать взаимосвязи динамических характеристик экзогенных геологических процессов и количественных параметров морфологической структуры ландшафтов (ландшафтных метрик) одного временного среза, а также факторы их определяющие.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования выполнялись на примере одного из наиболее распространенных ландшафтов криолитозоны — эрозионно-термокарстовая равнина.

Ландшафт эрозионно-термокарстовой равнины представляет собой слабоволнистую субгоризонтальную поверхность с преобладанием тундровой или лесотундровой растительности (пушицевые тундры, осоково-пушицевые тундры и др.), в которую вкраплены озера и хасыреи, а также местами развита нечастая эрозионная сеть (рис. 1). Озера часто имеют округлую форму и беспорядочно разбросаны по равнине. Хасыреи представляют собой плоскодонные и пологосклонные заторфованные понижения, также изометричной формы, занятые луговой или болотной растительностью и аналогично озерам в беспорядке располагающиеся на равнине. Внутри хасыреев могут оставаться мелкие остаточные озера, а также развиваться новые термокарстовые озера в случае, если продолжается возникновение новых термокарстовых понижений. В соответствии со взглядами большинства исследователей, хасыреи образуются в результате осушения термокарстовых озер, чаще всего в результате эрозионной деятельности водотоков.

Ландшафт эрозионно-термокарстовой равнины находится под влиянием сложно взаимодействующих термокарстовых, термоабразионных и

термоэрозионных процессов. Это проявляется в том, что:

- на территории возникают новые первичные термокарстовые понижения (если этот процесс продолжается),
- термокарстовые понижения растут независимо друг от друга как озера за счет термоабразионных процессов,
- в случайный момент времени озеро может быть спущено эрозионными процессами и превратиться в хасырей, при этом рост котловины останавливается из-за отсутствия водной массы.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Решение поставленной задачи — оценка взаимосвязи динамических характеристик экзогенных геологических процессов и количественных характеристик морфологической структуры ландшафтов (ландшафтных метрик) одного временного среза — может быть получено на основании подходов математической морфологии ландшафтов. Рассмотрим два варианта развития эрозионно-термокарстовых равнин:

- асинхронный старт (постоянно продолжается возникновение новых термокарстовых понижений),
- синхронный старт (первичные понижения возникли в начальный момент процесса и далее происходил только рост размеров термокарстовых озер).

Модель морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин в варианте *асинхронного старта* основывается на следующих допущениях:

1. Возникновения первичных термокарстовых понижений (очагов) за непересекающиеся отрезки времени (Δt) и на непересекающихся площадках (Δs) являются независимыми случайными событиями; вероятность возникновения понижения (p_1, p_k) зависит только от величины отрезка и площадки¹, средняя плотность генерации понижений остается постоянной:

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

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

где λ — параметр (средняя плотность генерации).

2. Возникновение первичных термокарстовых понижений не происходит на площади существующих термокарстовых озер.

¹ При этом для малых площадок и временных отрезков вероятность возникновения нескольких понижений много меньше, чем вероятность возникновения одного понижения.

3. Изменение радиуса возникшего термокарстового понижения представляет собой случайный процесс; оно происходит независимо от других озер, и его скорость, находясь под воздействием случайных факторов, при этом 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 пересекающихся площадках являются независимыми случайными событиями, и вероятность их определяется только величиной площадки².

Допущение 3, как показано ранее [1, 2], приводит к справедливости следующей закономерности — распределение радиуса свободно растущего термокарстового очага через время t после возникновения данного озера отвечает логнормальному распределению:

$$f_0(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma x\sqrt{t}}} e^{-\frac{(\ln x - at)^2}{2\sigma^2 t}},$$

где a , σ — параметры.

На основе модели можно выделить следующие основные независимые количественные характеристики процессов, развивающихся в ландшафтах эрозионно-термокарстовых равнин в ситуации асинхронного старта при росте озер пропорциональном плотности тепловых потерь:

- средняя скорость роста числа термокарстовых понижений на единицу площади на свободной поверхности (средняя плотность генерации) λ ,
- средняя скорость роста логарифма радиусов термокарстовых озер a ,
- средняя скорость роста дисперсии логарифма радиусов термокарстовых озер σ^2 .

Именно эти характеристики нужны при прогнозных и аналитических построениях. В силу этого одним из важных динамических параметров, который следует оценить, может являться отношение средней скорости роста числа термокарстовых понижений на единицу площади к средней скорости роста размеров озер (точнее логарифма радиусов термокарстовых озер):

$$\rho = \frac{\lambda}{a}.$$

Знание этого параметра позволит без дополнительных измерений при наличии данных о средней скорости роста размеров озер вычислить

² При этом для малых площадок вероятность наличия более, чем одного истока эрозионной формы много меньше, чем вероятность наличия одного истока.

среднюю скорость роста числа термокарстовых понижений на единицу площади и наоборот.

Покажем, что значение рассматриваемого динамического параметра может быть получено без длительных повторных наблюдений по значениям ландшафтных метрик одного временного среза.

Анализ математической модели динамики эрозионно-термокарстовых равнин в ситуации асинхронного старта показывает [2, 9], что при весьма общих условиях при значительном времени их развития происходит стабилизация большей части количественных характеристик морфологической структуры, и территория оказывается в состоянии динамического равновесия, характеризующегося рядом закономерностей. Они представляют собой предельные значения и предельные распределения ряда главнейших параметров морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин:

— предельное распределение площади озер (интегрально-экспоненциальное распределение):

$$f(x, \infty) = -\frac{1}{xEi(-\epsilon\gamma)} e^{-\gamma x}, \quad x \geq \epsilon, \quad (1)$$

— предельная средняя плотность расположения озер:

$$\tau = -\lambda(1 - P_d^*) \frac{Ei(-\epsilon\gamma)}{2a}, \quad (2)$$

— предельная средняя площадь озера:

$$s = -\frac{1}{\gamma Ei(-\gamma\epsilon)} e^{-\gamma\epsilon}, \quad (3)$$

— предельное распределение площади хасыреев (экспоненциальное распределение):

$$F_h(x, t) = 1 - e^{-\gamma x}, \quad (4)$$

— предельная заозеренность, связанная с предельными значениями средней площади озера и средней плотностью расположения озер:

$$P_d^* = 1 - e^{-\tau s}, \quad (5)$$

где $Ei(-x)$ — интегральная экспоненциальная функция, ϵ — начальная площадь термокарстового очага, P_d^* — предельное значение заозеренности, γ — средняя плотность расположения истоков эрозионных форм.

Справедливость вывода о реальности состояния динамического равновесия подтверждена эмпирической проверкой части полученных закономерностей на значительном числе участков в пределах эрозионно-термокарстовых равнин на территории Западной и Восточной Сибири и Аляски [3].

Аналогичная проверка, расширенная и уточненная по сравнению с более ранними нашими исследованиями, была проведена для распределений площадей хасыреев и их соответствия экс-

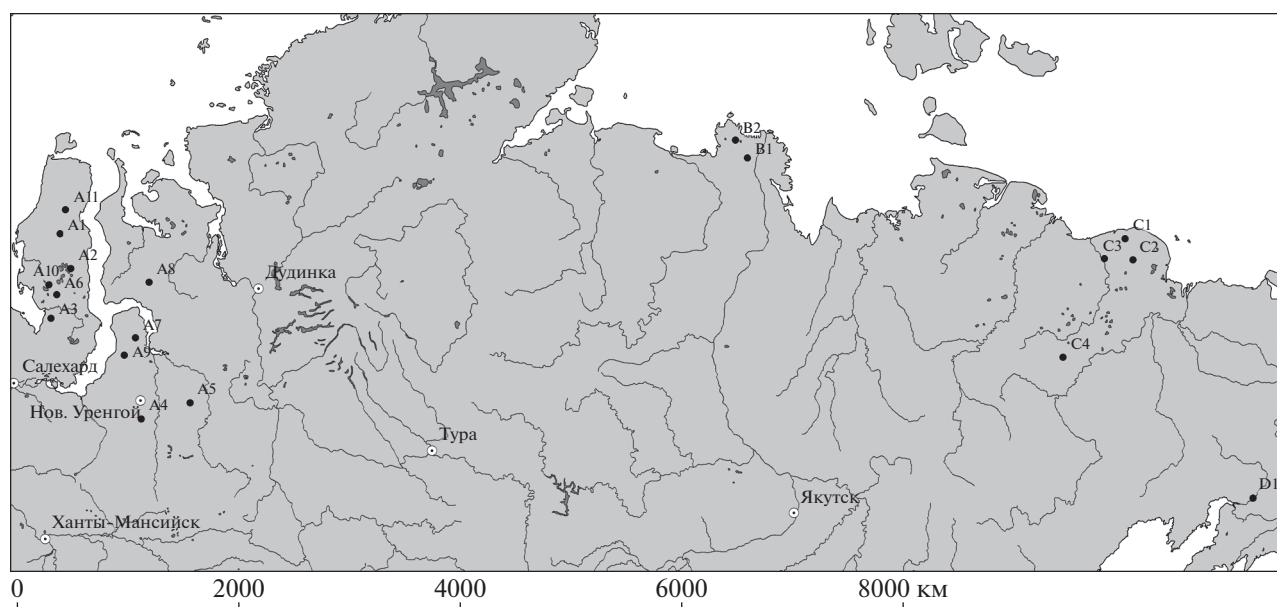


Рис. 2. Схема ключевых участков эрозионно-термокарстовых равнин при проверке распределения площадей хасыреев.

поненциальному распределению (рис. 2). Гипотеза подтверждается на 14 участках из 18 на уровне значимости 0.99 (табл. 1).

Таким образом, экспериментальные данные указывают на реальность и значительную распространенность состояния динамического равновесия термокарстово-эрозионных равнин.

Математический анализ полученных закономерностей позволил получить выражение для оценки значения рассматриваемого динамического параметра на основе измерения по однократному космическому снимку.

Подставляя в выражение для заозеренности (5) выражения средней плотности расположения озер (2) и их среднюю площадь (3) и упростив, получаем соотношение:

$$P_d^* = 1 - \exp \left[-\frac{\lambda}{2a\gamma} (1 - P_d^*) e^{-\gamma\epsilon} \right].$$

Преобразуя, получаем искомый параметр ρ :

$$\rho_1 = \frac{\lambda}{a} = -2\gamma e^{\gamma\epsilon} \frac{\ln[1 - P_d^*]}{[1 - P_d^*]}. \quad (6)$$

В данном выражении слева стоит искомый динамический параметр, а все переменные в правой части (заозеренность, средняя плотность расположения истоков эрозионных форм, минимальная площадь термокарстового озера) определяются прямым измерением по материалам **однократной** космической съемки. Средняя плотность расположения истоков эрозионных форм может определяться не прямо, так как нередко возникают затруднения из-за неопределенности положения истока, а по значению средней и минимальной площади термокарстового озера, решая относительно γ уравнение

$$s = -\frac{1}{\gamma Ei(-\gamma\epsilon)} e^{-\gamma\epsilon}.$$

Таким образом, можно определить соотношение скорости генерации термокарстовых озер и скорости их роста на основе измерения по однократному космическому снимку средней площади озер, минимального размера термокарстового озера и заозеренности.

Таблица 1. Соответствие теоретического (экспоненциального) и эмпирических законов распределения площадей хасыреев по критерию Пирсона*

Участок, объем выборки	B1, 90	B2, 114	A8, 93	A7, 127	C2, 352	C1, 89	A1, 97	A2, 62	A3, 97
Экспоненциальное распределение	0.005	0.034	0.390	0.084	0.000	0.749	0.179	0.000	0.539
Участок, объем выборки	A4, 43	A5, 49	C3, 176	A6, 143	D1, 85	A9, 73	A10, 122	A11, 76	C4, 178
Экспоненциальное распределение	0.447	0.281	0.372	0.153	0.225	0.191	0.396	0.723	0.001

* В таблице приведены значения p — величины дополнительной к квантилю, соответствующему фактическому значению критерия; гипотеза согласуется с выборкой на уровне 0.99, если p больше или равно 0.01; жирным шрифтом выделены случаи согласия с проверяемым теоретическим распределением.

Таблица 2. Расчетные значения соотношения скорости генерации термокарстовых озер и параметра роста размеров, определенного по значениям ландшафтных метрик одного временного среза в двух вариантах

Участок	Площадь, км ²	Объем выборки, шт.	ε , км ²	γ , км ⁻²	Заозеренность	Средняя площадь хасыреев, км ²	ρ_1	ρ_2
14	420	209	0.005434	3.95	0.22	1.83	2.57	0.76
18	97	62	0.001474	3.62	0.09	1.10	0.75	0.47
19	207	161	0.0005	3.50	0.05	0.46	0.38	0.61
21	1157	405	0.000662	1.69	0.15	1.04	0.65	0.86
22	2867	244	0.006012	0.54	0.05	3.30	0.06	0.08
23	123	257	0.000403	4.82	0.08	0.12	0.88	3.66
24	153	346	0.0002	1.81	0.66	0.19	11.52	47.30
28	1343	264	0.006898	0.26	0.50	2.15	0.71	2.13
30	441	519	0.000147	2.74	0.01	0.30	0.06	0.18
40	670	535	0.000163	5.68	0.03	0.29	0.36	0.57

В табл. 2 приведен пример расчета значений исследуемого динамического параметра ρ_1 описанным методом по материалам однократной космической съемки с использованием выражения (6) для участков, на которых подтвердилось состояние динамического равновесия морфологической структуры.

Значение этого же параметра может быть определено иным способом. Из предельного распределения площади хасырея (4) следует соотношение:

$$s_h = \frac{1}{\gamma},$$

где s_h — средняя площадь хасырея.

Этот вывод был экспериментально проверен на ключевых участках. На рис. 3 отражена теоретическая зависимость средней площади хасырея и средней плотности расположения истоков эрозионных форм и точки, отвечающие эмпирическим данным, относящимся к различным участкам. График показывает соответствие данных теоретическому выводу.

Выражая среднюю плотность расположения истоков эрозионных форм через среднюю площадь хасырея и используя формулу (6), получаем вторым способом другой индикатор, позволяющий определить соотношение скорости генерации термокарстовых озер и скорости их роста на основе измерения по однократному космическому снимку средней площади хасыреев, минимального размера термокарстового озера и заозеренности:

$$\rho_2 = -\frac{2 \ln[1 - P_d^*]}{s_h [1 - P_d^*]} \exp\left(\frac{\varepsilon}{s_h}\right),$$

где ε — начальная площадь термокарстового очага, P_d^* — предельное значение заозеренности, s_h — средняя площадь хасырея.

В выражении слева стоит искомый динамический параметр, а все переменные в правой части (заозеренность, средняя площадь хасырея) определяются прямым измерением по материалам однократной космической съемки.

Были выполнены первичные эмпирические исследования полученного результата (см. табл. 2). На десяти ключевых участках указанным методом были определены значения динамического параметра ρ , равного отношению плотности генерации термокарстовых озер и скорости роста размеров (точнее логарифма размеров).

Сопоставление значений оцениваемого параметра, полученных первым и вторым способом (за исключением участка 24), показывает:

— значения параметра изменяются в пределах 3.66–0.06,

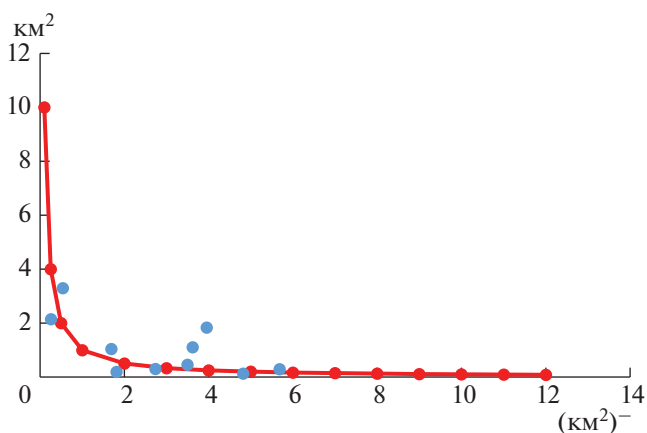


Рис. 3. Соответствие теоретической зависимости (линия) средней площади хасырея (по оси x) и средней плотности расположения истоков эрозионных форм (по оси y) и эмпирических данных (точки).

– отличия значений, рассчитанных первым и вторым методом, нередко совпадают по порядку величин,

– различия значений изменяются в пределах 2.78–0.02,

– коэффициент корреляции между значениями параметра, определенными первым и вторым способом, составляет 0.97.

Таким образом можно сделать вывод, что первичное апробирование осуществлено. В целом, в результате исследований на примере эрозионно-термокарстовых равнин в ситуации асинхронного старта получены по статическим значениям ландшафтных метрик значения динамического параметра – соотношение скорости генерации термокарстовых озер и скорости их роста, и предложены новые индикаторы количественных характеристик динамики опасных экзогенных процессов на основе использования ландшафтных метрик.

Был рассмотрен вариант развития эрозионно-термокарстовых равнин и в ситуации *синхронного* старта. Модель морфологической структуры этого ландшафта базируется на аналогичных допущениях, но второе исключено, а первое заменено на допущение 1а:

1а. Возникновения первичных термокарстовых понижений (очагов) происходили за короткий отрезок времени и на непересекающихся площадках (Δs) и являются независимыми случайными событиями; вероятность возникновения понижения зависит только от величины отрезка и площадки³:

$$p_1 = \mu \Delta s + o(\Delta s),$$

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

где μ – параметр (средняя начальная плотность расположения понижений).

Одним из существенных параметров динамики термокарстового процесса является соотношение (μ) скорости роста среднего логарифма радиуса термокарстового озера (a) и скорости роста дисперсии логарифма радиуса (σ) при свободном росте озера, не ограниченном эрозией:

$$\mu = \frac{a}{\sigma^2}.$$

Представляет интерес взаимосвязь этого соотношения с ландшафтными метриками территории эрозионно-термокарстовых равнин, которые поддаются прямому определению по материалам дистанционных съемок. Это тем более интересно, так как само соотношение не может быть пря-

мо определено без длительных стационарных наблюдений.

Задача может быть решена на основе разработанных моделей. Как показано нами ранее [2], из допущений модели морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин в варианте синхронного старта вытекает, что по прошествии большого времени распределение площади озер эрозионно-термокарстовых равнин отвечает выражению:

$$f_{sl}(x, \infty) = \frac{x^{\frac{a}{2\sigma^2}-1} e^{-\gamma x}}{\int_0^{+\infty} x^{\frac{a}{2\sigma^2}-1} e^{-\gamma x} dx}, \quad (7)$$

и является гамма-распределением. Найдем математическое ожидание площади озера, используя предельное распределение (7). В соответствии с известными выражениями для гамма-распределения оно равно:

$$M\xi_{sl} = \frac{a}{2\sigma^2\gamma}.$$

Математическое ожидание площади хасырея согласно (2) составляет:

$$M\xi_{sh} = \frac{1}{\gamma}.$$

Соответственно искомое соотношение μ может быть получено на основе ландшафтных метрик средней площади озер ($M\xi_{sl}$) и средней площади хасыреев ($M\xi_{sh}$), получаемых по однократному временному срезу,

$$\mu = \frac{2M\xi_{sl}}{M\xi_{sh}}.$$

Таким образом, для определения соотношения скорости роста среднего логарифма радиуса термокарстового озера и его дисперсии при свободном росте озера достаточно воспользоваться в условиях эрозионно-термокарстовых равнин с синхронным стартом соотношением средней площади термокарстового озера и средней площади хасырея без стационарных наблюдений.

ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования получены следующие выводы.

1. На основе использования математических моделей морфологической структуры выявлены взаимосвязи количественных параметров динамики термокарстовых процессов в пределах эрозионно-термокарстовых равнин – соотношения скорости генерации новых термокарстовых понижений, с одной стороны, и скорости роста их размеров или скорости роста дисперсии разме-

³ При этом для малых площадок и временных отрезков вероятность возникновения нескольких понижений много меньше, чем вероятность возникновения одного понижения.

ров, с другой, и количественных характеристик морфологической структур.

2. На базе ландшафтных метрик, определенных в текущий момент времени, получены конкретные выражения для параметров динамики термокарстовых процессов, которые по сути дела являются количественными индикаторами динамических параметров.

3. Полученный вывод прошел первичную апробацию в виде определения значений рассматриваемого параметра двумя разными способами.

4. Эмпирически подтверждено, что средняя площадь хасырея и средняя плотность расположения истоков эрозионных форм связаны гиперболической зависимостью.

5. Полученные взаимосвязи являются общими для рассматриваемого рода ландшафта (эрозионно-термокарстовая равнина), но зависят от характера развития процесса (синхронный старт и асинхронный старт).

6. Полученные взаимосвязи могут послужить основой для определения необходимых для прогноза и оценки рисков значений динамических параметров процессов без стационарных наблюдений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-05-00723.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Викторов А.С.* Математическая морфология ландшафта. М.: Тратек, 1998, 191 с.
2. *Викторов А.С., Капралова В.Н., Орлов Т.В., Трапезникова О.Н. и др.* Математическая морфология ландшафтов криолитозоны. М.: РУДН, 2016. 232 с.
3. *Викторов А.С., Трапезникова О.Н., Орлов Т.В., Садков С.А.* Использование подходов математической морфологии ландшафта при дистанционной оценке природных опасностей // *Геоэкология*. 2019. № 5. С. 61–73.
4. *Викторов С.В., Илюшина М.Т., Кузьмина И.В.* Эколого-генетические ряды растительных сообществ как индикаторы природных процессов // *Экология*. 1970. № 6. С. 88–94.
5. Методическое руководство по инженерно-геологической съемке масштаба 1 : 200000 (1 : 100000, 1 : 50000). М.: Недра, 1978. 391 с.
6. *Садков А.В., Ревзон А.Л., Чалидзе Ф.Н.* Изучение экзогенных процессов в районах крупных водохранилищ аэроландшафтным методом. М.: Недра, 1976. 49 с.
7. *Landscape Patterns in a Range of Spatio-Temporal Scales.* Alexander V. Khoroshev & Kirill N. Dyakonov (eds.), Springer, 2020. 439 с.
8. *Ritters K.H., O'Neill R.V., Hunsaker C.T. et al.* A factor of landscape pattern and structure metrics // *Landscape Ecology*. 1995. V. 10. № 1. P. 23–39.
9. *Victorov A.* Mathematical model of thermokarst and fluvial erosion plains // *GIS and Spatial Analysis*, Toronto. 2005. V. 1. P. 62–67.

REFLECTION OF THE QUANTITATIVE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF EXOGENOUS PROCESSES IN METRICS OF LANDSCAPE MORPHOLOGICAL PATTERNS

A. S. Victorov^{a,*}, T. V. Orlov^a, and V. N. Kapralova^a

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

^{*}*E-mail: dist@geoenvironment.ru*

Many researchers studied relationships between the characteristics of the processes occurring in a landscape and its modern state aimed at the process indication, engineering-geological research, and various landscape studies. The problem of reflecting processes in the external view of landscapes was posed and solved, but its quantitative aspect as a rule was not studied. The purpose of this paper is to show the relationship between the dynamic characteristics of exogenous geological processes and the quantitative characteristics of the landscape morphological pattern (landscape metrics), taking a single time slice, including their determining factors. As an example of our approach, the research involves one of the most widespread landscapes of the permafrost zone, i.e., thermokarst plains with fluvial erosion. The solution to this problem is obtained based on the mathematical morphology of landscapes and the mathematical models of the morphological pattern. The mathematical models of the morphological patterns reveal the interrelationships between the quantitative parameters of the thermokarst process dynamics within the thermokarst plains with fluvial erosion, such as the ratios between the generation rate and the size growth rate of thermokarst depressions reflected in the quantitative parameters of morphological patterns. Using the up-to-date landscape metrics, we obtained specific expressions for the dynamic parameters of thermokarst process, which, in fact, are the quantitative indicators of the dynamic parameters. The resulting conclusion was initially tested by determining the considered parameter in two different ways. The obtained relationships are universal for the considered landscape, i.e., the thermokarst plains with fluvial erosion; however, they depend on the process peculiarities (e.g., synchronous

or asynchronous start). The obtained relationships can help us to determine the dynamic parameters of processes necessary for risk forecasting and assessing without stationary observations.

Keywords: *mathematic morphology of landscape, mathematic models of morphological structures, landscape, erosional thermokarst plain, indication and reflection of processes*

REFERENCES

1. Victorov, A.S. *Matematicheskaya morfologiya landshafta* [Mathematical morphology of landscapes]. Moscow, Tratek Publ., 1998, 191 p. (in Russian)
2. Victorov, A.S., Kapralova, V.N., Orlov, T.V., Trapeznikova, O.N., et al. *Matematicheskaya morfologiya landshaftov kriolitozony* [Mathematical morphology of permafrost landscapes]. Moscow, RUDN Publ., 2016, 232 p. (in Russian)
3. Victorov, A.S., Trapeznikova, O.N., Orlov, T.V., Sadkov, S.A. *Ispol'zovanie podkhodov matematicheskoi morfologii landshafta pri distantsionnoi otsenke prirodnykh opasnostei* [Using approaches of mathematical morphology of the landscape for remote assessment of natural hazards]. *Geoekologiya*, 2019, no. 5, pp. 61–73. (in Russian)
4. Victorov, S.V., Ilyushina, M.T., Kuz'mina, I.V. *Ekologo-geneticheskie ryady rastitel'nykh soobshchestv kak indikator prirodnikh protsessov* [Ecological and genetic series of plant communities as indicators of natural processes]. *Ecologia*, 1970, no. 6, pp. 88–94. (in Russian)
5. *Metodicheskoye rukovodstvo po inzhenerno-geologicheskoi s'emke masshtaba 1 : 200000 (1 : 100000, 1 : 50000)* [Methodical guide for engineering geological survey to a scale of 1 : 200000 (1 : 100000, 1 : 50000)]. Moscow, Nedra Publ., 1978, 391p. (in Russian)
6. Sadov, A.V., Revzon, A.L., Chalidze, F.N. *Izucheniye ekzogennykh protsessov v raionakh krupnykh vodokhranilishch aerolandshaftnym metodom* [Study of exogenous processes in the areas of large reservoirs by the aerolandshape method]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 49 p. (in Russian)
7. Landscape patterns in a range of spatio-temporal scales. Khoroshev, A.V., Dyakonov, K.N., Eds., Springer, 2020, 439 p.
8. Ritters, K.H., O'Neill, R.V., Hunsaker, C.T., et al. A factor of landscape pattern and structure metrics. *Landscape Ecology*, 1995, vol. 10, no. 1, pp. 23–39.
9. Victorov, A. Mathematical model of thermokarst and fluvial erosion plains. *GIS and Spatial Analysis*, Toronto. 2005, vol. 1, pp. 62–67.