

- [7] Kokarev A. L., Shesterova I. N. Sovremennoe izmenenie gornyykh lednikov na yuzhnom sklone Dzhungarskogo Alatau // *Led i sneg*. 2014. N 4. S. 54—63.
- [8] Kutuzov S. S. Izmenenie lednikov vnutrennego Tyan'-Shanya za poslednie 150 let // Avtoref. dis. kand. geogr. nauk. M., 2009. 26 s.
- [9] Lednik Turgen'-Aksu. Frunze: Ilim, 1976. 105 s.
- [10] Mel'nikova A. P., Bakov E. K. K voprosu o degradatsii oledeneniya Severnogo Tyan'-Shane v golotsene // *MGI*. 1989. Vyp. 67. S. 80—86.
- [11] Mikhaleiko V. I., Arkhipov S. A., Kutuzov S. S. Degradatsiya gornogo oledeneniya v tropicheskikh i umerennykh shiroтах v period global'nogo potepleniya klimata // *Izv. RAN. Ser. geogr.* 2004. N 2. S. 35—41.
- [12] Oledenenie Tyan'-Shanya. M.: IG RAN, 1995. 237 s.
- [13] Podrezov O. A., Dikikh A. N., Bakirov K. B. Izmenchivost' klimaticheskikh usloviy i oledeneniya Tyan'-Shanya za poslednie 100 let // *Izv. KRSU*. 2003. S. 1—8.
- [14] Pomortsev O. A. Interpretatsiya sporovo-pyl'tsevykh spektrov vysokogoriy lednikovyykh i ne lednikovyykh rayonov (Pamiro-Alay, Tyan'-Shan') // *Zhurn. Ritm*. 2010. (5). S. 13—18.
- [15] Ponomarenko P. N. Atmosfernye osadki Kirgizii. L.: Gidrometeoizdat. 1976. 134 s.

Иzv. PГО. 2016. Т. 148, вып. 5

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ЛАНДШАФТА

© А. С. ВИКТОРОВ

Институт геоэкологии РАН, Москва
E-mail: vic_as@mail.ru

Статья посвящена исследованию циклических процессов изменения морфологической структуры ландшафта. Циклическими процессами мы называем процессы изменения природно-территориального комплекса, характеризующиеся повторением последовательности изменений. Такой процесс не является строго периодическим, но носит некоторые следы периодичности. В результате исследований удалось выделить три класса циклических процессов и показать их реализуемость в природе на конкретных примерах. Показано, что все классы циклических процессов изменения морфологической структуры ландшафта порождают состояние динамического равновесия.

Ключевые слова: циклические процессы, динамика морфологической структуры ландшафта, математическая модель морфологической структуры, эрозионно-термокарстовые равнины, аллювиальные равнины, оползневой процесс.

Циклическими процессами мы называем процессы изменения природно-территориального комплекса, характеризующиеся повторением последовательности изменений. Такой процесс не является строго периодическим, но носит некоторые следы периодичности. Элементы циклических процессов исследовались в ряде работ [3, 5, 6, 7], в частности большое внимание им уделялось в пределах нового научного направления — математической морфологии ландшафта [1, 4, 11].

Цель работы — дать первичную классификацию циклических процессов изменения морфологической структуры ландшафта, показать реальность вы-

деленных классов и взаимосвязь названных процессов с состоянием динамического равновесия в развитии морфологических структур.

Анализ динамики морфологической структуры территории с развитием циклических процессов позволяет выделить три отличающихся варианта, которые могут быть положены в основу выделения классов циклических процессов изменения морфологических структур:

— циклические процессы 1-го рода — характеризуются развитием циклических изменений на всей площади ландшафта с постоянной перестройкой всех границ природно-территориальных комплексов;

— циклические процессы 2-го рода — характеризуются развитием локальных циклических изменений морфологической структуры с перестройкой части границ природно-территориальных комплексов;

— циклические процессы 3-го рода — характеризуются циклическим изменением части природно-территориальных комплексов, входящих в состав морфологической структуры ландшафта, без существенных изменений их границ.

Примером циклических изменений 1-го рода является развитие эрозионно-термокарстовых равнин.

Исследуемый тип территорий представляет собой слабоволнистую субгоризонтальную поверхность с преобладанием различной тундровой растительности (пушицевые тундры, осоково-пушицевые тундры и др.), в которую вкраплены озера и хасыреи, а также местами в ее пределах развита нечастая эрозионная сеть (рис. 1). Озера имеют изометричную, часто округлую форму и беспорядочно разбросаны по равнине. Хасыреи представляют собой плоские понижения, также изометричной формы, занятые луговой или болотной растительностью, и аналогично озерам в беспорядке располагаются на равнине.

Рассматриваемый ландшафт формируется под влиянием термокарстовых, термоабразионных и термоэрозионных процессов, которые находятся в сложном взаимодействии. На территории идет постоянная генерация новых первичных термокарстовых понижений, которые заполняются водой и растут независимо друг от друга как озера за счет термоабразионных процессов. Рост регулируется случайными факторами, связанными с развитием метеорологических процессов конкретного года и пространственной изменчивостью грунтовых условий. Наконец, в случайный момент времени озеро может быть спущено эрозионными процессами и превратиться в хасырей — озерную котловину с лугово-болотной растительностью. Этот хасырей далее становится ареной новообразования мерзлоты и развития первичных термокарстовых понижений.

В целом территория предстает как сложная мозаика участков, которые в разное время прошли озерные стадии и стадии хасыреев.

Предположения модели включают следующие основные элементы:

1. Возникновение термокарстовых понижений за любой отрезок времени на выбранной площадке является случайным событием, независимым от других появлений, и его вероятность зависит только от длительности этого отрезка и величины площадки.

2. Рост возникшего термокарстового понижения представляет собой случайную величину, он происходит независимо от других озер, и скорость роста пропорциональна плотности тепловых потерь через боковую поверхность озерной котловины.

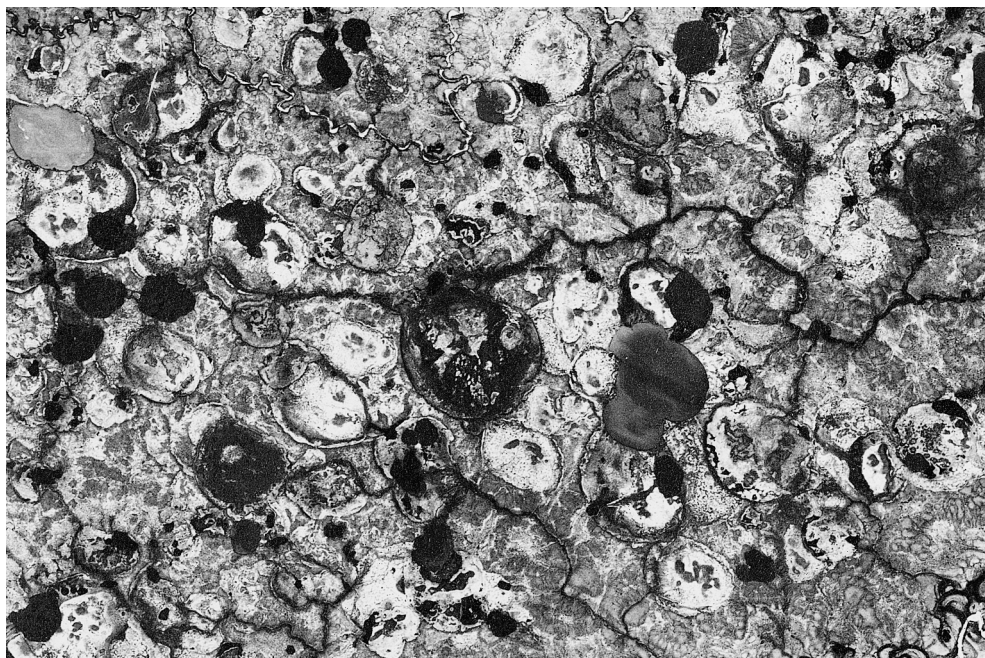


Рис. 1. Типичное изображение ландшафтного рисунка термокарстово-эрозионных равнин на материалах космической съемки.

3. 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.

4. Возникновение истоков эрозионных форм на случайно выбранной площадке — случайное событие, независимое от других появлений, и его вероятность зависит только от величины этой площадки.

Предположения данной модели — синтез двух канонических моделей озерных термокарстовых равнин и эрозионных равнин, рассмотренных нами в более ранних работах. В модели учитывается невозможность возникновения первичного термокарстового понижения в пределах существующего.

Перечисленные основные предположения позволяют создать математическую модель морфологической структуры термокарстово-эрозионных равнин и дают возможность предсказать поведение многих основных характеристик протекания термокарстового процесса.

Как было показано нами ранее [2, 10], при весьма широких условиях при большом времени развития на рассматриваемом типе территорий наступает состояние динамического равновесия в генерации термокарстовых очагов и превращения их в хасыреи. При этом на территории возникают определенные количественные соотношения между элементами морфологической структуры ландшафта, которые остаются стабильными во времени при неизменных климатических условиях. Это равновесие, как показал анализ [2, 10], характеризуется следующими выражениями:

— стационарное (предельное) распределение радиусов озер

$$f_l(x, \infty) = -\frac{2}{xEi(-\pi\gamma)} e^{-\pi\gamma x^2}, \quad x > 1; \quad (1)$$

— стационарное (предельное) распределение радиусов хасыреев

$$f_h(x, \infty) = 2\gamma x e^{-\gamma x^2}; \quad (2)$$

— стационарная (предельная) плотность расположения озер

$$\eta(\infty) = -\frac{\lambda}{2a} Ei(-\pi\gamma); \quad (3)$$

— стационарное (предельное) значение заозеренности

$$P_d^* = 1 - \exp\left(-\frac{\lambda}{2a\gamma} e^{-\pi\gamma}\right), \quad (4)$$

где $Ei(-x) = \int_{-\infty}^x \frac{e^{-u}}{u} du$ — интегральная экспоненциальная функция, γ , λ , a — параметры.

Ряд полученных выводов прошли первичную эмпирическую проверку [2, 10]. На рис. 2 показано соответствие эмпирического и теоретического распределения размеров термокарстовых озер.

Анализ развития рассматриваемой территории показывает, что каждая точка (элементарный участок) территории по сути дела проходит определенный цикл. Этот цикл характеризуется следующими стадиями:

— субаквальное развитие вследствие нахождения в пределах акватории термокарстового озера;

— развитие в составе территории хасырея, которое характеризуется постепенным изменением почвенного и растительного покрова, геоэкологических условий и других в соответствии с прошедшим временем субаэрального развития.

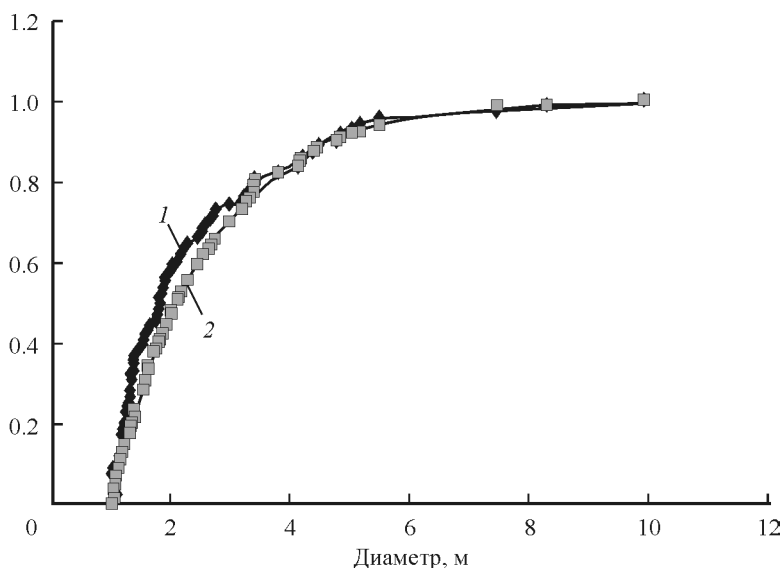


Рис. 2. Соответствие эмпирического (1) и теоретического (2) распределения размеров термокарстовых озер (Ямбургское газоконденсатное месторождение).

Затем снова после «захвата» точки акваторией нового или существующего, но расширившегося озера наступает стадия субаквального развития.

Таким образом, можно говорить о циклическом процессе. В качестве длительности цикла можно рассматривать длительность субазральной стадии; ее можно рассматривать как случайную величину, и одним из важных вопросов анализа настоящего процесса является вероятностное распределение длительности этой стадии (распределение периода ξ).

Такая территория характеризуется и определенными возрастными соотношениями, которые по сути дела определяют состояние почвенно-растительного покрова и геоэкологических параметров каждого участка. Так можно поставить вопрос об общем распределении возраста точек, охваченных процессом и вышедших из стадии активных очагов (из-под уровня озер). Точнее, пусть выбрана случайная точка — какова вероятность того, что она вышла из стадии озера менее t лет назад, т. е. возраст ее менее t лет.

Возраст точки территории определяется сроком формирования хасырея. Как показывает анализ, модель позволяет определить распределение возраста при прошествии значительного времени [10]

$$F_{\tau}(x) = 1 - \exp[-\lambda^* \overline{s_h} x - \lambda^* \overline{s_l}], \quad (5)$$

где $\overline{s_h}$ — средняя площадь хасырея, λ^* — предельная плотность генерации озер, и $\overline{s_l}$ — средняя площадь озера.

Таким образом, можно сделать вывод, что при значительном времени развития термокарстовых и эрозийных процессов ландшафт представляет собой «лоскутное одеяло», составленное из участков разного возраста (микро-возрастная дифференциация), и при этом распределение возраста участков отвечает экспоненциальному распределению со сдвигом.

Распределение длительности цикла можно определить, опираясь на то, что рассматриваемый процесс изменения точки можно рассматривать с позиций специального класса случайных процессов — процессов восстановления (см., например, [9]). Действительно, нахождение в стадии «субаквальное развитие» можно рассматривать как повторяющееся случайное событие. Интервал времени между этими событиями имеет постоянное (пока неизвестное) распределение, и величины разных интервалов в соответствии с допущениями модели независимы. Таким образом, выполняются все условия процессов восстановления.

Воспользовавшись результатами теории процессов восстановления, получаем, что при длительном времени развития между распределением периода ($F_{\xi}(u)$) и распределением интервала времени до последнего выхода из субаквальной стадии ($F_{\gamma}(x)$), которое является так называемым временем недо-скока в теории процессов восстановления, существует соотношение

$$F_{\gamma}(x) = \frac{1}{M\xi} \int_0^x [1 - F_{\xi}(u)] du. \quad (6)$$

Отсюда можно получить распределение периода циклического процесса

$$F_{\xi}(u) = 1 - M\xi f_{\gamma}(x), \quad (7)$$

где $f_{\gamma}(x)$ — плотность распределения интервала времени до последнего выхода из субаквальной стадии.

Используя выражения (5) и (6), нетрудно получить, что период рассматриваемого циклического процесса подчиняется экспоненциальному распределению

$$F_{\xi}(x) = 1 - \exp(-\lambda^* \overline{s_h} x). \quad (8)$$

Примером циклических изменений 2-го рода является развитие аллювиальных равнин.

Формирование ландшафтного рисунка на участке молодой аллювиальной равнины связано прежде всего с циклами развития одной излучины. Ландшафтная дифференциация на рассматриваемом участке образована сочетанием грив и межгровистых понижений с соответствующим почвенно-растительным покровом, зависящим как от возраста пакета, так и от положения внутри пакета, и связана с их генерацией при развитии и спрямлении излучины (рис. 3). Циклические изменения в морфологической структуре аллювиальных равнин связаны прежде всего с изгибанием и спрямлением излучины и поэтому локализованы в районе излучины; чем дальше от излучины, тем меньше вероятность изменений. Таким образом, излучины русла выступают как бы очагами генерации циклических изменений морфологической структуры ландшафта.

Спрявление излучины происходит неоднократно, поэтому каждый более молодой пакет «стирает» соответствующую часть предыдущего или пакет целиком. Могут целиком быть стерты несколько следующих друг за другом во времени пакетов.

Назовем интервал времени между последовательными спрямлениями излучины циклом развития излучины, а совокупность природно-территориальных комплексов (ПТК) грив и межгровистых понижений, генерирующихся за один цикл развития, — пакетом. Представленным пакетом (циклом) назовем пакет (цикл), имеющий нестертый фрагмент и представленный таким образом в современной морфологической структуре.



Рис. 3. Типичное изображение аллювиальной равнины на материалах космической съемки.

Полное или частичное стирание зависит от соотношения длительности циклов развития излучины. Если длительность более раннего цикла была больше, чем более позднего, то стиранию подвергается лишь часть пакета и остается сохранившийся его фрагмент. В противном случае стирается весь пакет.

Вследствие стирания примыкающие друг к другу в пространственном отношении фрагменты более молодого и более старого пакетов не следуют непосредственно друг за другом во времени, а разделены временным интервалом. В итоге в пределах аллювиальной равнины мы наблюдаем набор разновозрастных, разнесенных во времени фрагментов пакетов с развитием соответствующих природно-территориальных комплексов. Именно описанный сложный процесс обуславливает ландшафтную, в том числе и микровозрастную, дифференциацию аллювиальной равнины.

Подобная схема применима и к описанию дифференциации побережий, где стирающим фактором являются трансгрессии, а генерируются пакеты береговых комплексов (валов, террас и др.).

Исследования показывают [3], что подобная территория находится в состоянии динамического равновесия. Динамическое равновесие поддерживается за счет циклического процесса постоянного стирания некоторой части уже возникших фрагментов и генерации новых. При этом, как показал тот же анализ, сохраняются стабильными определенные общие количественные соотношения в морфологической структуре территории, а именно:

— распределение длины «стрелок» сохранившихся фрагментов пакетов (поперечник пакета по аналогии со стрелкой дуги)

$$F_{\varepsilon}(x) = 1 - e^{-\lambda x}, \quad (9)$$

где λ — величина, обратная средней величине стрелок представленных фрагментов пакетов;

— средние временные интервалы (разрывы) между последовательными сохранившимися фрагментами пакетов, которые образуют последовательность, сохраняющуюся несмотря на происходящие изменения,

$$M\mu_k = \frac{k-1}{\lambda} + \frac{(2^k-1)}{\lambda} \left[1 - k \sum_{n=2}^{+\infty} \frac{1}{n^{k+1}} \right], \quad (10)$$

или

$$M\mu_k = \frac{k-1}{\lambda} + \frac{(2^k-1)}{\lambda} [(k+1) - k\xi(k+1)], \quad (11)$$

где $\xi(z)$ — дзета-функция Римана, k — порядок представленного цикла.

Пример циклических изменений 3-го рода — развитие равнин с широким развитием оползневых процессов без существенных изменений очертаний оползневых участков, лавинных процессов.

Рассмотрим однородную в геологическом и физико-географическом отношении территорию с развитием оползней. Пусть активизация оползней происходит под действием локальных факторов, при этом пусть изменения в результате активизации затрагивают весь оползневой участок, но не приводят к существенному изменению его границ. Между моментами активизации про-

исходит определенная смена почвенно-растительного покрова в связи с зарастанием оползня и соответственно смена ПТК (модификаций ПТК), отвечающая стадиям процесса.

Подобная ситуация описана в ряде исследований. В частности, в криолитозоне [8] в связи с активизацией оползневой процесса было отмечено развитие сложного комплекса процессов, включающих:

- обновление экспозиции засоленных морских отложений,
- развитие процессов рассоления,
- изменение растительных сообществ в соответствии с изменением засоления грунтов,
- изменение геоэкологических характеристик участка.

В подобной ситуации время последней активизации определяет стадию, на которой находится изменение почвенно-растительного покрова и ПТК в целом. Таким образом, распределение времени активизации определяет площадные соотношения и соотношения плотности распределения ПТК, связанных с оползневой процессом, в морфологической структуре территории.

В проведенных исследованиях [5] обосновано, что, несмотря на то что каждый участок территории все время находится в состоянии квазипериодического изменения, общее соотношение ПТК, отвечающих различным стадиям процесса, остается постоянным — об этом свидетельствует наличие постоянного (предельного) распределения интервала времени до последней активизации. Таким образом, морфологическая структура территории находится в состоянии динамического равновесия.

Как показано, распределение числа оползней, находящихся в разных стадиях трансформации почвенно-растительного покрова, связано с распределением периода активизации следующими соотношениями:

$$F_1(x) = \frac{1}{M\xi} \int_0^x [1 - F(u)] du, \quad (12)$$

где $M\xi$ — среднее значение периода активизации, $F_1(x)$ — распределение интервала времени до последней активизации, $F(x)$ — распределение периода активизации.

Отсюда [5] дифференцированием получаем выражение для распределения периода активизации

$$F(x) = 1 - \frac{f_1(x)}{f_1(0)}, \quad (13)$$

где $f_1(x)$ — плотность распределения интервала времени до последней активизации.

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

1. Можно выделить три класса циклических процессов изменения морфологических структур ландшафтов.

2. Для циклических процессов изменения морфологической структуры ландшафта любого рода характерно возникновение состояния динамического равновесия в развитии морфологической структуры.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 15-05-04948 А.

Список литературы.

- [1] *Викторов А. С.* Методы математической морфологии ландшафта в инженерной геологии и геоэкологии // Геоэкология. 2003. № 5. С. 448—555.
- [2] *Викторов А. С.* Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука, 2006. 252 с.
- [3] *Викторов А. С.* Модель возрастной дифференциации аллювиальных равнин // Геоэкология. 2007. № 4. С. 302—303.
- [4] *Викторов А. С., Капранова В. Н.* Применение методов математической морфологии ландшафта для оценки риска поражения линейных инженерных сооружений опасными экзогенными процессами // Геоэкология. 2011. № 2. С. 165—174.
- [5] *Викторов А. С.* Модель динамического равновесия в развитии морфологической структуры ландшафта на основе стохастических процессов восстановления // Изв. РГО. 2013. Т. 145, вып. 6. С. 11—17.
- [6] *Виноградов Б. В., Попов В. А.* Вероятностный прогноз динамики экосистем дельты Амударьи // География и природные ресурсы. 1982. № 3. С. 23—31.
- [7] *Куст Г. С.* О понятии «гомеостаз» почвенного покрова и его применении в практических почвенных исследованиях // Докл. Междунар. науч. конф. «Пространственно-временная организация почвенного покрова: теоретические и прикладные аспекты». СПб., 2007. С. 17—17.
- [8] *Лейбман М. О.* Криогенные склоновые процессы и их геоэкологические последствия в условиях распространения ледовых пластов. Автореф. докт. дис. М., 2005. 48 с.
- [9] *Розанов Ю. А.* Случайные процессы. М.: Наука, 1979. 184 с.
- [10] *Viktorov A. S.* An Integrated Mathematical Model for Diffuse Exogenous Geological Processes // Proceedings of the 9th Annual Conference of International Association for Mathematical Geology. IAMG 2003 Portsmouth, UK, September 7—12, 2003.
- [11] *Viktorov A. S.* Risk Assessment Based on the Mathematical Model of Diffuse Exogenous Geological Processes // Mathematical Geology. 2007. Vol. 39, N 8. P. 735—748.

Поступило в редакцию
27 января 2016 г.

Probabilistic models of cyclic processes of landscape morphological pattern changing

© A. S. Viktorov

IEG RAS, Moscow
E-mail: vic_as@mail.ru

The paper deals with a research of cyclic changing of the morphological pattern of landscape. By a cyclic changing we mean the process of nature unit changing which is characterized by repeating succession of changes. This process is not strictly periodical but one can find certain traces of periodicity in it. Our research revealed three classes of the cycling processes, which were found in nature as real cases. It is shown that all classes of the cyclic processes of morphological landscape patterns changing initiate the state of dynamic equilibrium.

Key words: cyclic processes, dynamics of landscape morphological pattern, mathematical model of morphological pattern, thermokarst plains with fluvial erosion, alluvial plains, landslide process.

References

- [1] *Viktorov A. S.* Metody matematicheskoy morfologii landshafta v inzhenernoj geologii i geoe'kologii // *Geoe'kologiya*. 2003. N 5. S. 448—555.
- [2] *Viktorov A. S.* Osnovnye problemy matematicheskoy morfologii landshafta. M.: Nauka, 2006. 252 s.
- [3] *Viktorov A. S.* Model' vozrastnoj differenciacii allyuvial'nyx ravnin // *Geoe'kologiya*. 2007. N 4. C. 302—303.
- [4] *Viktorov A. S., Kapralova V. N.* Primenenie metodov matematicheskoy morfologii landshafta dlya ocenki riska porazheniya linejnyx inzhenernyx sooruzhenij opasnymi e'kzogennymi processami // *Geoe'kologiya*. 2011. N 2. S. 165—174.
- [5] *Viktorov A. S.* Model' dinamicheskogo ravnovesiya v razvitii morfologicheskoy struktury landshafta na osnove stoxasticheskix processov vosstanovleniya // *Izv. RGO*. 2013. T. 145, vyp. 6. C. 11—17.
- [6] *Vinogradov B. V., Popov V. A.* Veroyatnostnyj prognoz dinamiki e'kosistem del'ty Amudar'i // *Geografiya i prirodnye resursy*. 1982. N 3. S. 23—31.
- [7] *Kust G. S.* O ponyatii «gomeostaz» pochvennogo pokrova i ego primenenii v prakticheskix pochvennyx issledovaniyax // *Dokl. Mezhdunar. nauch. konf. «Prostranstvenno-vremennaya organizaciya pochvennogo pokrova: teoreticheskie i prikladnye aspekty»*. SPb., 2007. S. 17—17.
- [8] *Lejzman M. O.* Kriogennye sklonovye processy i ix geoe'kologicheskie posledstviya v usloviyax rasprostraneniya plastovyx l'dov. Avtoref. dokt. dis. M., 2005. 48 s.
- [9] *Rozanov Yu. A.* Sluchajnye processy. M.: Nauka, 1979. 184 s.
- [10] *Viktorov A.* An Integrated Mathematical Model for Diffuse Exogenous Geological Processes // *Proceedings of the 9th Annual Conference of International Association for Mathematical Geology. IAMG 2003 Portsmouth, UK, September 7—12, 2003*.
- [11] *Viktorov A. S.* Risk Assessment Based on the Mathematical Model of Diffuse Exogenous Geological Processes // *Mathematical Geology*. 2007. Vol. 39, N 8. P. 735—748.

От редакционной коллегии

Вероятностная модель случайного процесса (функции) является развитием моделей случайного события, последовательности случайных событий и случайной величины. Она описывается в терминах вероятностных характеристик, содержащих параметр (время, пространственные координаты). Это известно автору, поскольку он ссылается на работу [9]. Однако в рукописи используется терминология моделей случайных событий и величин, т. е. в математическом смысле название рукописи не соответствует ее содержанию.