

УДК :551.435.122:551.435.627:624.131.13

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ЛАНДШАФТОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЭКЗОГЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ¹

© 2018 г. А. С. Викторов^{1,*}, А. Л. Дорожко¹

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

*E-mail: vic_as@mail.ru

Поступила в редакцию 25.12.2017 г.

Развитие ряда ландшафтов происходит под влиянием экзогенных процессов, сочетающих противоположные тенденции развития, в этом случае возможно циклическое изменение ландшафтов, которое откладывает особый отпечаток на возможности индикации текущих процессов, мониторинг процессов. Цель работы – исследование циклического развития ландшафтов под влиянием экзогенных геологических процессов (ЭГП) на основе математического моделирования. Циклическим процессом назван процесс изменения природно-территориального комплекса, характеризующийся повторением последовательности изменений. Такой процесс не является строго периодическим, но носит некоторые следы периодичности. Задача исследована на основе изучения формирования аллювиальных равнин и ландшафтов с широким развитием сложного циклического процесса. Сложным циклическим процессом развития морфологической структуры ландшафта назван циклический процесс, активизация которого наступает под действием двух групп факторов – локальных, действующих на отдельные участки (оползневые, лавинные процессы и др.), и “глобального”, действующего на всю территорию. В целом проведенное исследование позволяет сделать ряд существенных выводов. Экзогенные процессы могут привести к циклическим изменениям в ландшафте территории. Циклическое изменение территории приводит к состоянию динамического равновесия, характеризующегося специфическими закономерностями, зависящими от генетического типа процесса. Количественные характеристики морфологической структуры территории с циклическими изменениями могут нести индикационную информацию о динамических параметрах развитых ЭГП. Создана модель ландшафта с развитием сложного циклического процесса. В его основе лежат представления о марковских цепях со счетным числом состояний.

Ключевые слова: математическая морфология ландшафта, экзогенные процессы, циклические процессы, марковские цепи, динамическое равновесие в морфологических структурах, моделирование морфологических структур

DOI: 10.1134/S0869780318040117

Развитие ряда ландшафтов происходит под влиянием экзогенных процессов, сочетающих противоположные тенденции развития. В этом случае возможно циклическое изменение ландшафтов, которое откладывает особый отпечаток на возможности индикации текущих процессов, мониторинг процессов. Подобные процессы с элементами повторяющегося развития исследовались в пределах аллювиальных и эрозионно-термокарстовых равнин, территорий с развитием оползневых и лавинных процессов и др. В то же время пути моделирования подобного развития остаются мало исследованными [3, 5].

Цель настоящей работы – исследование циклического развития ландшафтов под влиянием экзогенных геологических процессов (ЭГП) на основе моделирования.

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 [1–3, 5].

Анализ позволяет выделить типы циклических процессов, характеризующихся:

- развитием локальных циклических изменений морфологической структуры с перестройкой части (или всех) границ природно-территориальных комплексов,

¹ Исследования выполнены в рамках фундаментальных научных исследований по госбюджетной теме № гр. АААА-А18-118022190118-4 и при финансовой поддержке гранта РФФИ №15-05-04948.

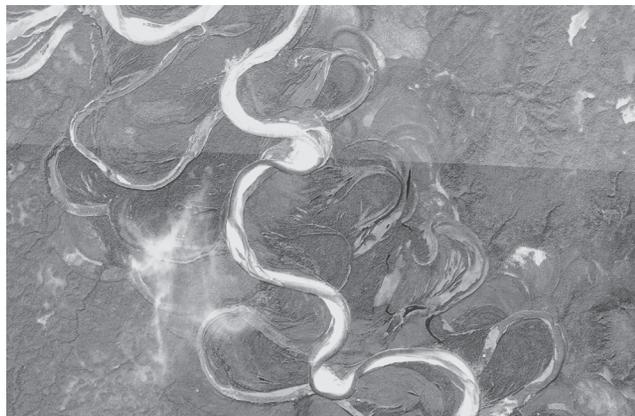


Рис. 1. Типичное изображение аллювиальной равнины на материалах космической съемки.

- циклическим изменением части природно-территориальных комплексов, входящих в состав морфологической структуры ландшафта, без существенных изменений их границ.

Пример первого типа циклических изменений — 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 межгривистых 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. 1). Циклические изменения в морфологической структуре аллювиальных равнин связаны, главным образом, с изгибанием и спрямлением излучины и поэтому локализованы в районе излучины, т.е. чем дальше от излучины, тем меньше вероятность изменений. Таким образом, излучины русла представляют собой как бы очаги генерации циклических изменений морфологической структуры ландшафта.

Спрявление излучины происходит неоднократно, и 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 межгривистых понижений, генерирующихся за один цикл развития, пакетом. Представленным пакетом (циклом) назовем пакет (цикл), имеющий нестертый фрагмент в современной морфологической структуре.

Полное или частичное стирание зависит от отношения 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 ПТК. 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 (валы, террасы и др.).

В основу моделирования подобного развития может быть положена модель морфологической структуры аллювиальных равнин [1]. В частности модель базируется на следующем допущении — вероятность спрямления излучины за интервал времени Δt зависит от величины этого интервала и не зависит от поведения других излучин, при этом вероятность более чем одного спрямления в малый интервал времени много меньше, чем вероятность одного спрямления

$$p_d = \lambda \Delta t + o(\Delta t), \quad (1)$$

где λ — параметр, характеризующий тот или иной процесс.

Исследования показывают [1], 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, определенные общие количественные соотношения в морфологической структуре территории остаются стабильными, а именно:

- распределение длины “стрелок” сохранившихся фрагментов пакетов (поперечник пакета по аналогии со стрелкой дуги)

$$F_e(x) = 1 - e^{-\lambda x}, \quad (2)$$

где λ — параметр равный величине обратной средней величине стрелок представленных фрагментов пакетов;

- распределение числа “стрелок” молодых фрагментов пакетов (I порядка) — также аналогичное экспоненциальное распределение;

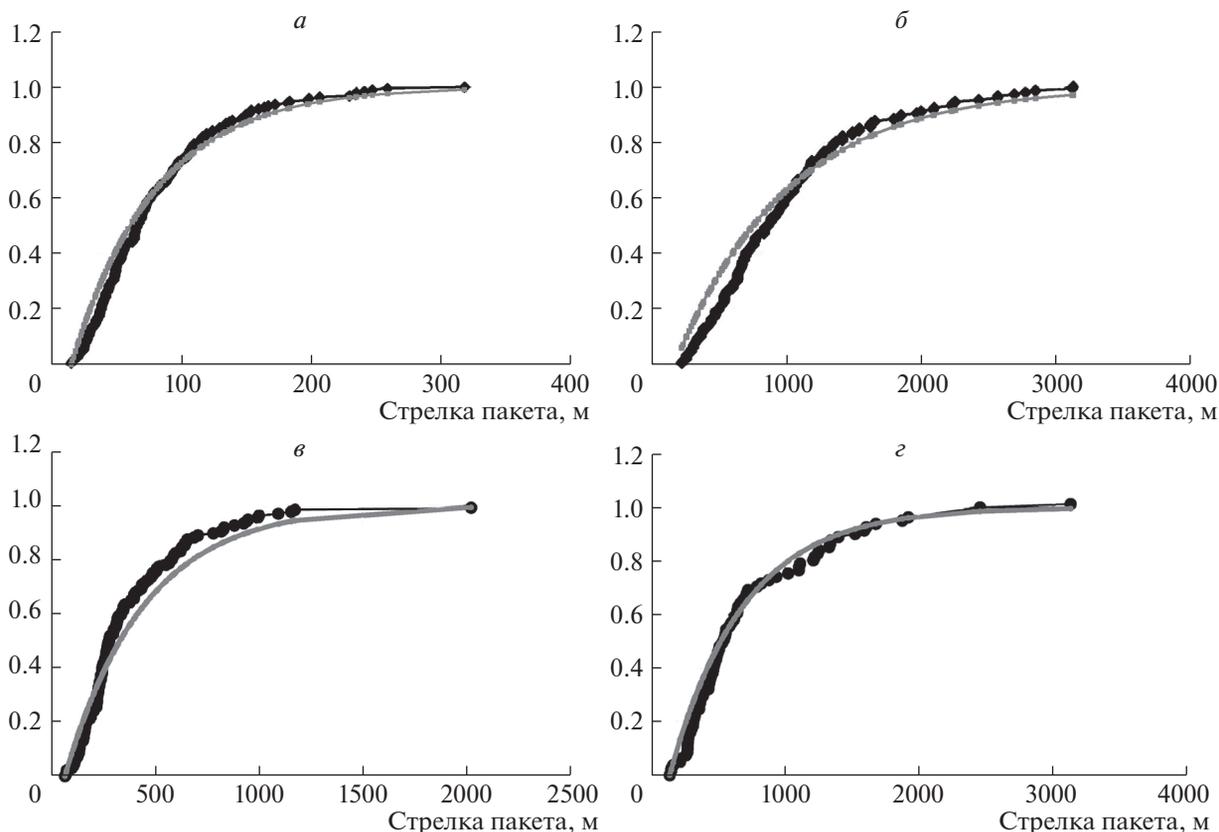


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных кривых распределений стрелок сохранившихся фрагментов пакетов и теоретических кривых (серая линия) экспоненциального распределения со сдвигом для участка аллювиальных равнин: а – р. Вах, б – р. Таз, в – р. Кета, г – р. Коюкек.

- распределение числа стертых циклов между k -м и $(k + 1)$ -м представленными циклами

$$P_k(m) = \sum_{s=0}^m \frac{(-1)^s m!}{s!(m-s)!(s+2)^k}. \quad (3)$$

Результаты проверки (рис. 2, таблица 1) показывают, что выводы модели подтверждаются сравнением распределений эмпирических дан-

ных с теоретическими по критерию Пирсона на уровне значимости 0.95.

Таким образом, результаты моделирования показывают, что ландшафт аллювиальных равнин находится в состоянии циклического изменения.

Пример второго типа циклических изменений – развитие территорий с широким распространени-

Таблица 1. Таблица соответствия эмпирических распределений для стрелок аллювиальных пакетов и теоретического распределения (экспоненциальное со сдвигом)

Участок	Объем выборки	Сдвиг, м	χ^2	$\chi_{0.95}^2$
Участок 1 (сохранившиеся фрагменты пакетов)	190	15	23.451	37.652
Участок 1 (формирующиеся пакеты)	48	15	2.375	11.070
Участок 2 (сохранившиеся фрагменты пакетов)	146	172	26.932	32.671
Участок 2 (формирующиеся пакеты)	39	172	4.367	9.490
Участок 3 (сохранившиеся фрагменты пакетов)	83	140	6.495	111.070
Участок 4 (сохранившиеся фрагменты пакетов)	137	67	2.558	9.488
Участок 5 (сохранившиеся фрагменты пакетов)	75	104	28.683	16.62

Примечание: эмпирические данные не противоречат теоретическим на уровне значимости 0.95, если $\chi^2 < \chi_{0.95}^2$.

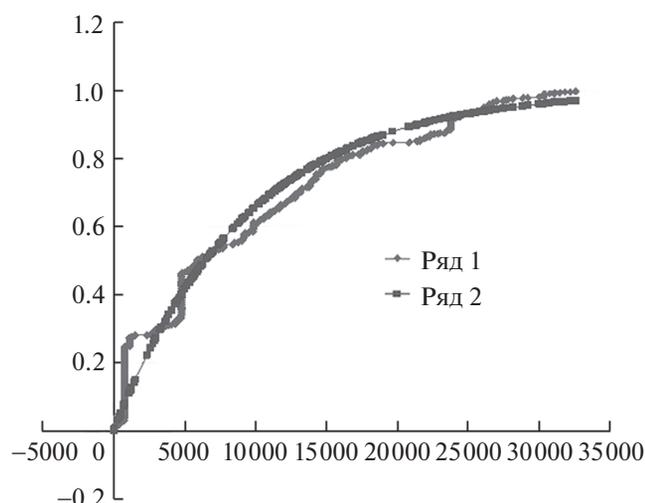


Рис. 3. Распределение времени активизации оползней (ряд 1) и график экспоненциального распределения (ряд 2) (объем выборки 897); уступы отвечают шквальной активизации под действием сильных штормов (по шкале абсцисс время в сутках от начала наблюдения).

ем оползневых процессов без существенных изменений очертаний оползневых участков.

Сложным циклическим процессом развития морфологической структуры ландшафта мы называем циклический процесс, активизация которого наступает под действием двух групп факторов — локальных, действующих на отдельные участки, и “глобального”, действующего на всю территорию.

Примером подобной территории может быть ландшафт района г. Сиэтла (США), находящийся под воздействием оползневых процессов.

Формирование и активизация оползней здесь приурочены преимущественно к рыхлым отложениям плейстоцен-голоценового возраста (стадиал Вашингтона, оледенение Фрейзера). Озерно-ледниковые отложения представлены плотными пылеватыми глинами с включениями небольших линз из мелкозернистых песков, часто перекрытыми флювиогляциальными мелко- и среднезернистыми песками с локальными гравелистыми включениями. Среди четвертичных отложений выделяются аллювиальные гравелистые пески, делювиальные суглинки и супеси, отложения пляжей, коллювиальные отложения, а также антропогенные отложения. Значительный вклад в формирование оползней вносит режим осадков, грунтовых вод и инфильтрации. Среди оползней района Сиэтла различается четыре группы оползней, из которых наиболее многочисленной и интересной для нашего исследования оказалась группа малоглубинных коллювиальных оползней (оползни скольжения).

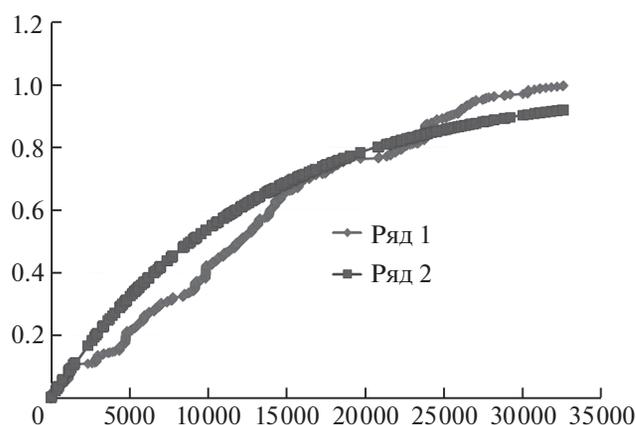


Рис. 4. Распределение времени активизации оползней (ряд 1) и график экспоненциального распределения (ряд 2) (объем выборки 608) без шквальной активизации под действием сильных штормов (по шкале абсцисс время в сутках от начала наблюдения).

В процессе мониторинга, проведенного исследователями, создана обширная база данных [6], содержащая сведения о нескольких сотнях оползней, при этом наблюдения длились около 100 лет. В результате в базе зафиксировано всего 1050 оползневых участков (оползней), 1326 случаев активизации всех оползней за все периоды наблюдения, случаев повторных активизаций оползней — 263. Активизация оползней на территории происходит как под действием локальных факторов, так и под действием характерных для района штормовых явлений. Во время штормов создаются условия для синхронной массовой активизации оползней.

В процессе обработки данных получено распределение времени активизации оползней (рис. 3).

На графике хорошо видны вертикальные отрезки на кривой, отвечающие массовой активизации оползней, связанной со штормами (для сравнения приведена также кривая экспоненциального распределения). На рис. 4 приведено то же распределение с изъятymi данными, относящимися к массовой активизации.

Интересно попытаться создать модель сложного циклического процесса. Рассмотрим однородную в геологическом и физико-географическом отношении территорию с развитием циклического процесса. Пусть активизация этого процесса происходит под действием двух групп факторов: локальных факторов (условно назовем “локальной” активизацией), действующих независимо на каждом участке развития процесса, и фактора, действующего одновременно на всю территорию (условно назовем “шквальной” активизацией).

В качестве первой группы факторов могут выступать локальные ливни, локальное таяние льда в многолетнемерзлых породах и др.; в качестве

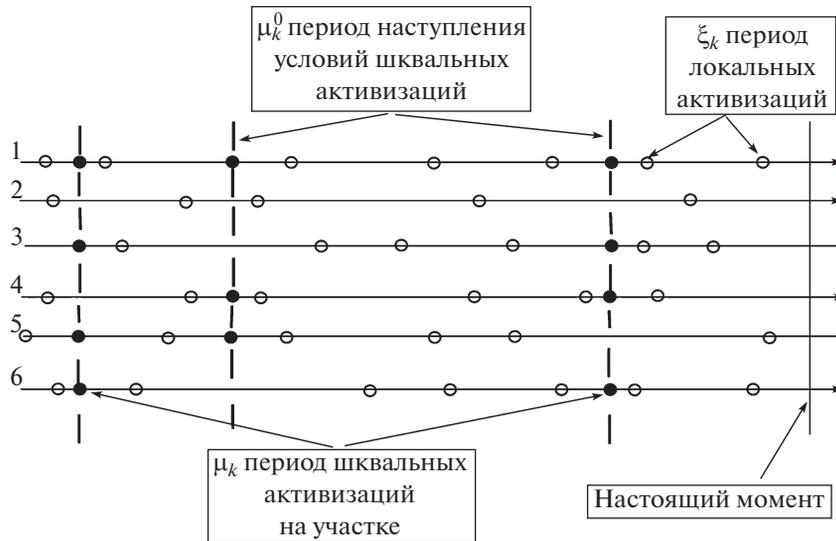


Рис. 5. Схема активизаций сложного циклического процесса (пояснения в тексте).

второй – землетрясения, аномальное повышение температуры воздуха на всей исследуемой территории, аномальное выпадение жидких осадков или снега и др.

При возникновении условий шквальной активизации реальная активизация на конкретном участке может произойти или нет.

Между моментами активизации на участках с непосредственным развитием процесса происходят определенная смена микрорельефа, почвенно-растительного покрова в связи с восстановлением и соответственно смена ПТК (модификаций ПТК), отвечающая стадиям процесса. В подобной ситуации время последней активизации определяет стадию, на которой находится в настоящий момент изменение почвенно-растительного покрова и ПТК в целом, то есть, характеристики ПТК. Таким образом, распределение времени активизации определяет площадные соотношения и соотношения количества ПТК, находящихся в разных стадиях восстановления, в морфологической структуре территории в каждый момент времени.

Наконец, пусть исследователь располагает данными о датировке последней активизации по внешнему облику ПТК, находящихся в разных стадиях восстановления, в морфологической структуре территории, по данным дендрохронологии, геологическим данным, по геоботаническим индикационным данным, почвенным данным и др. Задача состоит в получении информации о параметрах динамики протекающих процессов, что позволит осуществлять вероятностный прогноз следующей активизации выбранного конкретного участка.

Используем следующую модель (рис. 5). Примем интервал между соседними локальными активизациями оползня как последовательность

случайных величин ($\xi_k, k = 1, 2, \dots$), имеющих некоторое не меняющееся во времени распределение ($q(i), i = 1, 2, \dots, q(i) > 0$). При этом для разных циклов активизации эти случайные величины в силу локальности действия факторов активизации являются независимыми. Аналогично примем интервал между соседним наступлением условий шквальной активизации оползня как последовательность случайных величин ($\mu_k^0, k = 1, 2, \dots$), имеющих некоторое не меняющееся во времени распределение ($r^0(s), s = 1, 2, \dots, r^0(s) > 0$), отличное от первого. При этом для разных циклов активизации эти случайные величины также являются независимыми.

В основе модели лежат следующие допущения:

1. Локальная активизация для разных участков не зависит друг от друга и распределение ее периода постоянно во времени ($q(i), i = 1, 2, \dots, q(i) > 0$)
2. Распределение периода наступления условий шквальной активизации постоянно во времени ($r^0(s), s = 1, 2, \dots, r^0(s) > 0$), при этом наступление реальной активизации на конкретном участке не зависит от других участков и имеет постоянную вероятность (α).

При этих допущениях схема активизаций подобного циклического процесса дается на рис. 5.

Определим распределение периода реальной активизации на участке, связанной с наступлением условий шквальной активизации. Оно не совпадает с распределением периода наступления условий шквальной активизации, так как реальная активизация может при этом не наступить.

Время, через которое на участке наступает активизация, связанная с наступлением условий шквальной активизации, дается выражением

$$\mu = \mu_1^0 + \mu_2^0 + \dots + \mu_v^0, \quad v = 1, 2, \dots, \quad (4)$$

где v – число периодов между наступлениями условий шквальной активизации, приходящихся на один период между реальными активизациями, связанными с наступлением условий шквальной активизации на данном участке. Иначе говоря, время, через которое на участке наступает активизация, связанная с наступлением условий шквальной активизации, представляет собой сумму случайного числа случайных величин μ_k^0 , $k = 1, 2, \dots$

Из второго допущения нетрудно получить, что величина v числа периодов между наступлениями условий шквальной активизации, приходящихся на один период между реальными активизациями, подчиняется геометрическому распределению

$$p_v(k) = (1 - \alpha)^{k-1} \alpha, \quad (5)$$

где α – вероятность реальной активизации при наступлении условий шквальной активизации.

Распределение периода реальной активизации на участке, связанной с наступлением условий шквальной активизации (μ_k , $k = 1, 2, \dots$), можно найти, используя производящие функции (например, [4]). Если $\varphi_0(z)$ – производящая функция для величины μ_k^0 , $k = 1, 2, \dots$, нетрудно показать, что с учетом (1) и (2), и что при сложении независимых случайных величин производящие функции перемножаются, производящую функцию для интересующего периода реальной активизации на участке, связанной с наступлением условий шквальной активизации (μ_k , $k = 1, 2, \dots$), можно найти из выражения

$$\varphi(z) = \alpha \varphi_0(z) + (1 - \alpha) \alpha \varphi_0^2(z) + \dots + (1 - \alpha)^{k-1} \alpha \varphi_0^k(z) + \dots,$$

а после упрощения из выражения

$$\varphi(z) = \frac{\alpha \varphi_0(z)}{1 - (1 - \alpha) \varphi_0(z)}.$$

По производящей функции $\varphi(z)$ нетрудно найти само распределение периода реальной активизации на участке ($r(s)$, $s = 1, 2, \dots$, $r(s) > 0$), связанной с наступлением условий шквальной активизации. Согласно теории производящих функций распределение дается выражением

$$P(\mu = k) = \frac{1}{k!} \left. \frac{d^k \varphi(z)}{dz^k} \right|_{z=0}.$$

Модель описанного выше процесса может рассматриваться как цепь Маркова, и это может быть

базой для решения основного вопроса. Назовем состоянием участка возможной активизации циклического процесса пару чисел

$$(i, s), \quad i, s = 0, 1, 2, \dots, \quad i \leq s,$$

где s – время, прошедшее с последней шквальной активизации на рассматриваемом участке; i – время, прошедшее с последней локальной активизации. В состояниях, исходя из анализа допущений модели, возможны три варианта переходов:

$(i - 1, s - 1) \Rightarrow (i, s)$, $i, s = 0, 1, 2, \dots$, $i \leq s$ – продолжение процесса восстановления (вероятность p_1),

$(i - 1, s - 1) \Rightarrow (0, s)$, $i, s = 0, 1, 2, \dots$, $i \leq s$ – локальная активизация (вероятность p_2),

$(i - 1, s - 1) \Rightarrow (0, 0)$, $i, s = 0, 1, 2, \dots$, $i \leq s$ – шквальная активизация (вероятность p_3).

Вероятность первого перехода – это по сути дела вероятность того, что на следующем шаге (i, s) не будет никакой активизации при условии, что ее не было до этого. Поэтому с учетом независимости локальной и шквальной активизации вероятность дается выражением

$$p_1 = \left[1 - \frac{q(s)}{\sum_{k=s}^{+\infty} q(k)} \right] \left[1 - \frac{r(s)}{\sum_{k=i}^{+\infty} r(k)} \right]$$

или
$$p_1 = \frac{G(s+1) D(i+1)}{G(s) D(i)},$$

где $G(s) = \sum_{k=s}^{+\infty} q(k)$, $D(i) = \sum_{k=i}^{+\infty} r(k)$.

Вероятность второго перехода, учитывая необходимое отсутствие шквальной активизации, дается выражением

$$p_2 = \frac{G(s+1)}{G(s)} \left[1 - \frac{D(i+2)}{D(i+1)} \right],$$

вероятность третьего перехода

$$p_3 = 1 - \frac{G(s+1)}{G(s)}.$$

Из выражений видно, что вероятности переходов не зависят от времени, соответственно, рассматриваемая цепь является марковской цепью со счетным числом состояний.

Используя приведенные выше переходные вероятности, можно записать выражения для смежных состояний. Так, вероятность $p_0(i, s, t)$ оказаться в состоянии (i, s) в момент t после состояния ($i - 1, s - 1$) дается выражением

$$p_0(i, s, t) = p_0(i - 1, s - 1, t - 1) \frac{G(s+1) D(i+1)}{G(s) D(i)}, \quad (6)$$

Вероятность локальной активизации в момент t дается выражением

$$p_0(0, s, t) = \frac{G(s+1)}{G(s)} \times \sum_{i=0}^{s-1} p_0(i, s-1, t-1) \left[1 - \frac{D(i+2)}{D(i+1)} \right]. \quad (7)$$

Наконец, вероятность шквальной активизации в момент t дается выражением

$$p_0(0, 0, t) = \sum_{s=1}^{+\infty} \left[\left[1 - \frac{G(s+1)}{G(s)} \right] \sum_{i=0}^{s-1} p_0(i, s-1, t-1) \right]. \quad (8)$$

Определим свойства рассматриваемой цепи. Можно показать, что в ней возможен переход с положительной вероятностью между любыми двумя состояниями, т.е. любые состояния являются сообщающимися, а соответственно цепь – неприводимой. Можно показать, что возврат в любое состояние возможен за один шаг, а вся цепь аperiodична. Наконец, нетрудно показать, что средний период активизации конечен, в силу этого цепь возвратна. Неприводимая, аperiodическая, положительно возвратная цепь Маркова является по соответствующей теореме [4] эргодической, поэтому существуют пределы вероятностей перехода в каждое состояние при большом времени развития процесса

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} p(i, s; j, r, t) = p(j, r), \\ j, r = 0, 1, 2, \dots, \quad j \leq r.$$

Последние вероятности (финальные вероятности) представляют собой не что иное, как долю участков развития рассматриваемого процесса (очагов) с различным внешним обликом (микрорельеф, почвенно-растительный покров и др.) в силу того, что они имеют различное время последней локальной и шквальной активизации.

Были изучены возможности индикационного использования полученной модели. В задаче индикации процессов – индикации динамических параметров текущих процессов; таким параметром является распределение периодов активизации, несущее всю информацию о динамике рассматриваемого процесса, в том числе необходимую для прогноза на вероятностной основе. Из выражений (6, 7, 8), переходя к пределу при $t \rightarrow +\infty$ и имея в виду эргодичность, получаем

$$p(i, s) = p(i-1, s-1) \frac{G(s+1)}{G(s)} \frac{D(i+1)}{D(i)}, \quad (9)$$

$$p(0, s) = \frac{G(s+1)}{G(s)} \sum_{i=0}^{s-1} p(i, s-1) \left[1 - \frac{D(i+2)}{D(i+1)} \right], \quad (10)$$

$$p(0, 0) = \sum_{s=1}^{+\infty} \left[\left[1 - \frac{G(s+1)}{G(s)} \right] \sum_{i=0}^{s-1} p(i, s-1) \right]. \quad (11)$$

После раскрытия скобок в выражении (10) получаем

$$p(0, s) = \frac{G(s+1)}{G(s)} \sum_{i=0}^{s-1} p(i, s-1) - \sum_{i=0}^{s-1} p(i, s-1) \frac{G(s+1)}{G(s)} \frac{D(i+2)}{D(i+1)},$$

затем, выражая последние члены из (6) и упрощая, получаем

$$p(0, s) = \frac{G(s+1)}{G(s)} \sum_{i=0}^{s-1} p(i, s-1) - \sum_{i=0}^{s-1} p(i+1, s).$$

Отсюда

$$\frac{G(s+1)}{G(s)} = \frac{\sum_{i=0}^s p(i, s)}{\sum_{i=0}^{s-1} p(i, s-1)},$$

перемножая по s и сокращая, получаем

$$G(s) = \frac{\sum_{k=0}^{s-1} p(k, s-1)}{p(0, 0)}.$$

Отсюда следует, что распределение периода шквальной активизации дается выражением

$$r(s) = G(s) - G(s+1) = \frac{\sum_{k=0}^{s-1} p(k, s-1) - \sum_{k=0}^s p(k, s)}{p(0, 0)}.$$

Используя равенство (9) при $s = i$ и перемножая обе части, получаем с учетом $D(1) = G(1) = 1$

$$G(i)D(i) = \frac{p(i-1, i-1)}{p(0, 0)},$$

а значит

$$D(i) = \frac{p(i-1, i-1)}{\sum_{k=0}^{i-1} p(k, i-1)},$$

и распределение периода локальной активизации дается выражением

$$q(s) = D(s) - D(s+1) = \frac{p(s-1, s-1)}{\sum_{k=0}^{s-1} p(k, s-1)} - \frac{p(s, s)}{\sum_{k=0}^s p(k, s)}.$$

Финальные вероятности представляют собой не что иное как процент участков развития процесса с разным временем последней активизации, находящихся в настоящий момент в тех или иных стадиях восстановления, т.е. с различными осо-

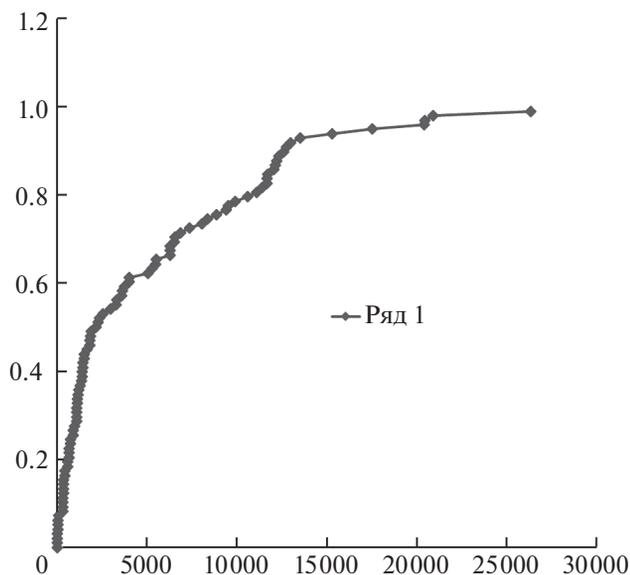


Рис. 6. Распределение периода активизации оползней без штормов (объем выборки 118, по шкале абсцисс время в сутках).

бенностями почвенно-растительного покрова и др. Иначе говоря, эти вероятности могут быть очевидным образом определены при количественном анализе морфологической структуры ландшафта и отдельных компонентов, они относятся к физиономическим элементам, и в силу полученных равенств по ним могут быть определены индикаты, в качестве которых выступают распределения периодов активизации. Таким образом разработанная модель позволяет вести количественную индикацию процессов, что безусловно является новым элементом ландшафтной индикации.

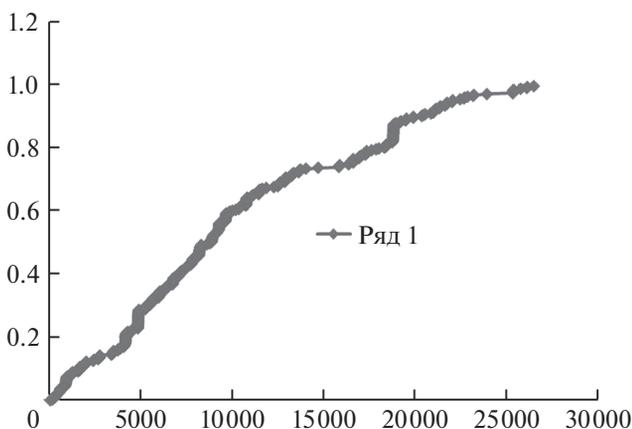


Рис. 7. Распределение времени последней активизации оползней без учета шквальной активизации под действием сильных штормов (объем выборки 360, по шкале абсцисс время в сутках).

В настоящее время сделаны первые шаги в направлении эмпирической проверки настоящей модели. Так на рис. 6 можно видеть распределение периода локальной активизации оползней для ландшафта района Сиэтла. Для его определения из выборки были изъяты элементы, отвечающие шквальной активизации в результате штормов.

В результате проведенных исследований была построена также функция эмпирического распределения времени последней активизации (рис. 7). Эта функция в принятых обозначениях отвечает выражению

$$P(i) = \sum_{k=0}^{i-1} \sum_{j=k}^{+\infty} p(k, j).$$

Эмпирическая проверка модели в настоящее время продолжается.

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

- экзогенные процессы могут привести к циклическим изменениям в ландшафте территории;
- циклическое изменение территории приводит к состоянию динамического равновесия, характеризующегося специфическими закономерностями, зависящими от генетического типа процесса;
- количественные характеристики морфологической структуры территории с циклическими изменениями могут нести индикационную информацию о динамических параметрах развитых экзогенных геологических процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Викторов А.С.* Модель возрастной дифференциации аллювиальных равнин // *Геоэкология*. 2007. № 4. С. 302–303.
2. *Викторов А.С.* Модель динамического равновесия в развитии морфологической структуры ландшафта на основе стохастических процессов восстановления // *Известия РГО*. 2013. Т. 145. Вып. 6. С. 11–17.
3. *Виноградов Б.В., Попов В.А.* Вероятностный прогноз динамики экосистем дельты Аму-Дарьи // *География и природные ресурсы*. 1982. № 3. С. 38–45.
4. *Королюк В.С., Портенко Н.И., Скороход А.В. и др.* Справочник по теории вероятности и математической статистике. М.: Наука, 1985. 640 с.
5. *Куст Г.С.* О понятии “гомеостаз” почвенного покрова и его применении в практических почвенных исследованиях / Сб. матер. междунар. науч. конф. “Пространственно-временная организация почвенного покрова: теоретические и прикладные аспекты”. С-Пб.: С-ПбГУ, 2007. С. 17
6. Shannon&Wilson, Inc. Seattle Landslide Study. 2000. http://www.seattle.gov/dpd/cs/groups/pan/@pan/documents/web_informational/dpdp025740.pdf

MODELING OF CYCLING LANDSCAPE CHANGES AS AFFECTED BY EXOGENOUS GEOLOGICAL PROCESSES

A. S. Victorov^{a,#} and A. L. Dorozhko^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*

Some types of landscapes develop under the impact of exogenous processes, combining opposite trends of development; this may result in cyclic change of a landscape, which put a special imprint on the possibility of current processes indication as well as process monitoring. The work deals with cycling development of landscapes under the impact of exogenous geological processes (EGP) based on modeling. The processes of land unit change characterized by a repeating sequence of changes are called cyclic processes. This process is not actually strictly periodic, but it has got some traces of periodicity. The problem is studied for the forming alluvial plains and landscapes with wide development of the complex cyclic process. A complex cyclic process is a cyclic process, which is activated by two groups of factors: local factors, influencing on certain sites and global ones, acting within the whole area (landslides, snow avalanches, etc.). As a whole, the conducted research allows us to draw a number of essential conclusions. Exogenous processes can lead to cyclical changes in the landscape of the territory. A cyclic change of the territory leads to a state of dynamic balance, characterized by the specific laws depending on the genetic type of the territory. Quantitative characteristics of the morphological pattern for a territory with a cyclic change can get indication data about dynamic parameters of current exogenous geological processes. A model of a landscape with the complex cyclic process is done on the basis of Markov chains with a countable number of states.

Key words *mathematical morphology of landscape, exogenous processes, cyclic processes, Markov chains, dynamic balance in morphological structures, modeling of morphological structures*

REFERENCES

1. Victorov, A.S. *Model' vozrastnoi differentsiatsii allyuvial'nykh ravnin* [The model of age differentiation for alluvial plains]. *Geoekologiya*, no. 4, 2007, pp. 302–303. (in Russian)
2. Victorov, A.S. *Model' dinamicheskogo ravnovesiya v razvitii morfologicheskoi struktury landshafta na osnove stokhasticheskikh protsessov vosstanovleniya* [The model of dynamic balance in the development of landscape morphological pattern based on stochastic renewal processes]. *Izvestiya RGO*, 2013, vol. 145, issue 6, pp. 11–17. (in Russian)
3. Vinogradov, B.V., Popov, V.A. *Veroyatnostnyi prognoz dinamiki ekosistem del'ty Amu-Dar'i*. [Probabilistic forecast of ecosystem dynamics delta of the Amu Darya]. *Geografiya i prirodnyye resursy*, 1982, no. 3, pp. 38–45. (in Russian)
4. Korolyuk, V.S., Portenko, N.I., Skorokhod, A.V. et al. *Spravochnik po teorii veroyatnosti i matematicheskoi statistike*. [A guide to theory of probability and mathematical statistics] Moscow, Nauka, 1985, 640 p. (in Russian)
5. Kust, G.S. *O ponyatii "gomeostaz" pochvennogo pokrova i yego primenenii v prakticheskikh pochvennykh issledovaniyakh* [On the concept of "homeostasis" of the soil cover and its application in practical soil research]. *Doklady mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Prostranstvenno-vremennaya organizatsiya pochvennogo pokrova: teoreticheskiye i prikladnyye aspekty"* [Proc. Intern. Scientific Conference on spatiotemporal arrangement of soil cover: theoretical and applied aspects]. St. Petersburg, SPbGU, 2007, p. 17. (in Russian)
6. Shannon & Wilson. Inc. *Seattle Landslide study*. 2000. http://www.seattle.gov/dpd/cs/groups/pan/@pan/documents/web_informational/dpdp025