

**THE RELIEF AGE PROBLEM: LOCAL (ISLANDS OF THE SOUTH PRIMORIE)  
AND REGIONAL (RUSSIAN SOUTHEAST) ASPECTS  
(PAPER 2. QUESTIONS OF PRACTICE)**

**A.A. GAVRILOV**

**S u m m a r y**

The history of the development of the South Primorye Islands represents a phenomenon of the conservatism of landforms which have formed more than 250 million years ago and were preserving their morphology and structural-substantial basis up to now, in spite of the tectonic regime inversion and repeated changes in morphogenesis conditions. General evolution of this Island system of rises is described by the following schematic model: volcano-plutonic ridge ( $P_2$ ) – intrusive horst ( $P_2$ ) – buried horst ( $T_{1-2}$ ) – regenerated horst ( $K_2$ ) – residual horst ( $N_1$ ) – a number of uncovered domical and block structures ( $N_2 - Q_4$ ). The cause of the prolonged heredity of their development seats in a number of factors: increased thicknesses of granite-metamorphic layer – “roots of mountains” – under the orogens and individual tectonic-magmatic rises; existence of a skeleton network of deep faults; prevalence of vertical tectonic motions and others. The comparative analysis of regional schemes of the Russian Southeast orogenic systems (geosynclinal-folded, arch-block, terrane and others) formation and development showed that the incompleteness of our knowledge about geological structure and morphogenetic processes causes the dependence of historic-genetic reconstructions on the subjective views and the purposes of researchers.

УДК 551.4

© 2011 г. Р.Р. МУРАКАЕВ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ МИКРОРУЧЕЙКОВОЙ СЕТИ НА  
СКЛОНАХ**

**Введение**

Речной бассейн часто рассматривается в качестве примера каскадной системы, состоящей из подсистем, динамически связанных потоками массы и энергии [1]. В его пределах существует сложная система водотоков, которую образуют временные потоки (микроручьи) на склонах междуречий и русловые потоки в овражно-балочной сети, а также постоянные русловые потоки, формирующие речные сети [2]. Общей закономерностью строения систем водотоков, возникающих в период выпадения дождей, таяния снега или существующих постоянно, является древовидность их структуры. Одновременно можно констатировать отсутствие единой системы кодирования элементов подобных каскадных систем, начиная от водоразделов и заканчивая устьями рек. В большой степени это обусловлено тем, что в зоне формирования микроручьев на элементарных склонах, в овражно-балочной сети территорий сложно организовать и выполнять натурные наблюдения, а также учитывать вариабельность параметров временных потоков воды [3]. Возможным решением проблемы является математическое моделирование структуры ручейковой сети, которое может оказаться полезным для познания закономерностей формирования сети водотоков на элементарных склонах и для использования выявленных закономерностей в процессе разработки вышеупомянутой единой схемы кодирования временных и постоянных потоков на поверхности суши. В статье представлены результаты использования подобного подхода к выявлению изменчивости структуры микроручейковой сети в зависимости от характеристик элементарных склонов, а также рассмотрены масштабные эффекты изменения характеристик этой структуры при ее последовательном усложнении.

## Структура временных и постоянных водотоков

Проблема формализации структуры водотоков наиболее полно решена в отношении русловых сетей [4–7 и др.]. Основная идея большинства схем кодирования водотоков заключается в присвоении произвольному элементу русловой сети (реке) количественного признака его размера (величины). Ключевое значение при этом имеет задание размера водотоков первого порядка ( $N = 1$ ). Оно осуществляется по-разному в различных системах кодирования. Тем не менее порядки рек, оцененные в рамках конкретных подходов, коррелятивно связаны между собой [8].

Известны попытки структурного кодирования и элементов овражно-балочной сети [9]. Начальный элемент овражной сети устанавливался по морфологическим признакам, соответствующим начальным проявлениям процесса формирования оврагов. В соответствии с нисходящей древовидной схемой объединения небольших оврагов в более крупные эрозионные формы определяется их порядок. При этом возникает соответствие между линейными, площадными характеристиками оврагов разного размера и площадью их водосборов.

Попытка типизировать ручейковую сеть на склонах предпринята в работе [10]. К ручьям типа 1 отнесены мельчайшие элементарные струйки воды между повышениями и понижениями поверхности склона. Ручьями второго типа названы водотоки, возникающие при слиянии ручьев первого типа. Они перемещаются в руслах, названных “эфемерными”. Ручьи третьего типа также имеют эфемерное русло, но оно располагается в естественном понижении рельефа. Ручьи четвертого типа имеют постоянные русла и могут соответствовать постоянным или временным водотокам в овражно-балочной сети территории. Для каждого из этих типов водотоков характерны особые морфометрические и гидрологические характеристики, изменяющиеся по длине ручьев [11].

Порядки и типы временных водотоков, выделяемые в пределах речных бассейнов, пока увязаны лишь в отдельных звеньях единой эрозионной сети водосборов. Общую схему кодирования элементов структуры временных и постоянных водотоков территории можно основывать на соответствии площадей частных водосборов и расходов воды, которые могут сформироваться в их пределах. В силу скудности данных наблюдений за временными нерусловыми потоками, формирующимися в верхней части склонов, возможным способом определения соотношений между структурными и гидрологическими характеристиками в рамках разработки единой схемы кодирования может стать моделирование структуры микроручейковой сети.

### Модель формирования ручейковой сети

Дождевые и талые воды на поверхности склонов на некотором расстоянии от водораздела начинают формировать микроручейковую сеть. Преобразование пластового потока, типичного для приводораздельной части склона, в струйчатые обусловлено первичной неровностью поверхности склонов и снижением затрат энергии на перемещение воды с ростом глубины склонового потока воды [2]. По наблюдениям Н.А. Ржаницына [6], формирующаяся древовидная структура ручьев длиной до 300 м близка по строению речной сети. По мнению А.С. Девдариани [12], она хорошо воспроизводится методами математического моделирования. При этом расположение элементов сети ручейков определяется первичной неровностью поверхности склона и имеет вероятностный характер [3].

В разработанной автором статьи модели этого процесса формирование первичной сети ручейков на склоне (без учета эрозионно-аккумулятивных процессов) также имеет вероятностный характер. Он определяется входными параметрами модели, учитывающими изменчивость высотных отметок поверхности склона. Подобная изменчивость может соответствовать склонам двух типов [3]. На склонах, в пределах которых горизонталы расположены практически параллельно друг другу, формиру-

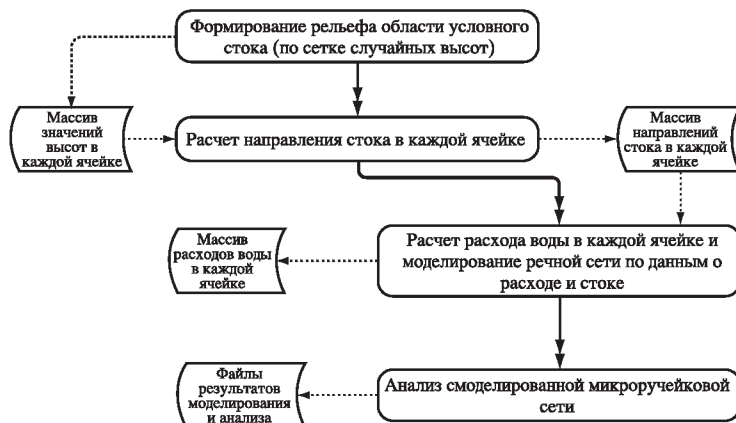


Рис. 1. Блок-схема моделирования структуры ручейковой сети на элементарном склоне

ются параллельные водные потоки. При случайном расположении выступов шероховатости на поверхности склона система ручейков приобретает неупорядоченный (древовидный) вид.

Блок-схема алгоритма моделирования структуры микроручейковой сети приведена на рис. 1. Ручейковая сеть в модели воспроизводится для участка склона прямоугольной формы. В качестве начальных параметров задается длина, ширина, высота, уклон (синус угла наклона склона) и показатель, характеризующий степень всхолмленности участка. Для определения направления стока в конкретных точках склона и формирования ручейковой сети используется расчетная сетка высот с равносторонними четырехугольными ячейками (с длиной стороны  $a$ ). Высота каждой ячейки  $H_{яч}$  определяется суммой двух составляющих: базового значения (рассчитанного по заданному уклону склона  $I$ , расстоянию от подножия склона  $l_{яч}$  и высоте подножия склона  $H_{мин}$ ) и случайной прибавки  $h_{случ}$ , находящейся в определенном диапазоне:

$$H_{яч} = H_{мин} + I \cdot l_{яч} + h_{случ}.$$

В свою очередь,  $h_{случ}$  определяется по формуле:

$$h_{случ} = a \cdot I \cdot \Delta_R \cdot P,$$

где  $P$  – случайное значение из диапазона  $[-1; 1]$ , следовательно,  $h_{случ} \in [-a \cdot I \cdot \Delta_R; a \cdot I \cdot \Delta_R]$ . Таким образом, показатель всхолмленности смоделированного рельефа  $\Delta_R$  ( $\Delta_R \in [0; +\infty]$ ) является независимым исходным параметром, позволяющим определить диапазон, в котором будет находиться. Чем больше его значение, тем более всхолмленный рельеф генерируется в модели. Так, если  $\Delta_R = 0$ , то  $h_{случ} \in [0; 0]$  и область условного формирования стока представляет собой плоскую наклоненную (с заданным средним уклоном) поверхность. В случае, если  $\Delta_R = 1$ ,  $h_{случ} \in [-a \cdot I; a \cdot I]$ , то есть максимальная случайная прибавка к высоте отдельной ячейки по модулю равна обусловленному заданным уклоном перепаду высот между центрами соседних ячеек, следующих друг за другом вниз по склону.

По сформированному полю высот моделируется направление потоков в каждой ячейке. Для этого определяется ячейка с минимальной высотой (среди восьми смежных ячеек), в направлении которой ориентируется моделируемый ручей из исходной ячейки. Расход сформировавшегося потока рассчитывается по заданной на начало моделирования величине поступления воды на поверхность отдельной ячейки  $q_i$  (предполагается равномерное поступление воды на эту поверхность в пределах всего склона). В ячейках, в которые поступает вода из ячеек с большей высотой, собственная

водоотдача суммируется с транзитным расходом воды. В итоге для каждой ячейки, на которые разбита поверхность участка склона, определяется слой стока с учетом поступления воды с вышерасположенных ячеек.

В качестве критерия формирования сосредоточенного стока (перехода от плоскостного стока к струйчатому потокам) используется минимальный расход воды, соответствующий началу струйчатого размыва  $Q_K$  (задается в качестве параметра модели). Взаимосвязанное множество ячеек, в которых объем стекающей воды превышает этот критический расход ( $q_i > Q_K$ ), формирует ручейковую сеть. В пределах ручейковой сети выделяются изолированные системы водотоков, которые обуславливают большую или меньшую густоту сети, отличаются по размерам (порядкам), длине, дренируемой площади.

### Анализ результатов расчета

Как уже отмечалось выше, для передачи неровностей рельефа используется случайная знакопеременная прибавка к высотам ячеек расчетной сетки. Диапазон, в котором находится прибавка, определяется при помощи показателя всхолмленности  $\Delta_r$ , указываемого в качестве входного параметра моделирования. Поскольку прибавка генерируется случайным образом для каждой ячейки, в результате двух любых попыток моделирования с одними и теми же входными параметрами формируются различающиеся поля высот (хотя и с равными значениями амплитуды разброса высот ячеек от высот, вычисленных по заданному уклону). Для того, чтобы уменьшить влияние случайных факторов при проведении анализа результатов моделирования, сам процесс для каждого заданного (анализируемого) набора параметров повторялся 25 раз, после чего характеристики ручейковых сетей, сформированных для конкретного набора параметров, усреднялись.

Значения входных параметров модели (табл. 1) задавались на основе анализа результатов исследований различных авторов для центральной части европейской территории России. Поскольку древовидное строение сети ручейков прослеживается на склонах протяженностью до 300 м [6], в модели длина и ширина условного склона для моделирования приняты равными 300 м.

Поступление воды на поверхность склона в модели считается равномерным по всей его поверхности. При приблизительной оценке величины поступления предполагалось, что она соответствует разности между поступлением воды из снега (водоотдачей снега) и потерями на впитывание и задержание в неровностях микрорельефа. При этом в модели были приняты два допущения: не учитывались потери в процессе водоотдачи, а сама она была принята равной интенсивности таяния снега (без учета повторного замерзания, испарения и впитывания снежным покровом). Для расчета величины поступления воды на поверхность склона использовалось значение интенсив-

Таблица 1

Значения исходных параметров модели

Параметры	Значение
Ширина области формирования стока, м	300
Длина области формирования стока, м	300
Ширина ячейки координатной сетки, $a$ (м)	5
Величина модуля талого стока, л/см <sup>2</sup>	0.0006
Предельно малый расход воды для перехода от плоскостного стока к струйчатому потоку, $Q_K$ (л/с)	0.05
Средний уклон	3°
Фактор всхолмленности рельефа, $\Delta_{rnd}$	0.5

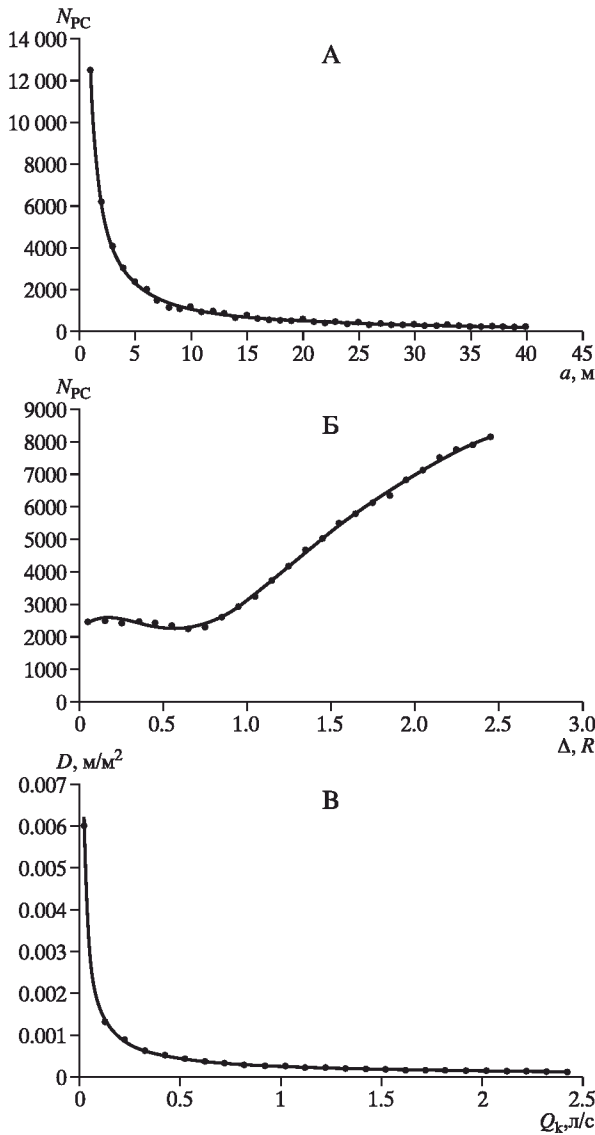


Рис. 2. Зависимости: А – числа изолированных ручейковых сетей  $N_{PC}$  от размера ячейки расчетной сетки  $a$ , Б – то же от фактора всхолмленности  $\Delta_R$ , В – густоты смоделированной ручейковой сети  $D$  от критического расхода воды  $Q_K$

ности таяния, рассчитанное по среднему значению коэффициента стаивания для открытой местности. Для лесной зоны (севернее  $55^\circ$  с. ш.) оно равно 5–5.2 мм на один градус положительной среднесуточной температуры [13]. Расчет проводился для дня со средней суточной температурой  $10^\circ\text{C}$  (условия резкой оттепели, в период которой формируются максимальные расходы воды). Средний суточный слой стаявшего снега в этом случае равен 5 см, что эквивалентно поступлению на поверхность склона  $0.0006 \text{ л/см}^2$  талой воды.

Натурные исследования процесса формирования талого стока показывают, что скорости склоновых потоков воды составляют в среднем  $0.3\text{--}0.5 \text{ м/с}$ , а средние минимальные глубины потоков –  $1\text{--}3 \text{ см}$  [3]. Если форму поперечного сечения русел ручейков заменить полукругом с радиусом, равным глубине, то минимальный расход воды таких ручейков близок к  $0.05 \text{ л/с}$ . При такой и большей величине расхода воды на склонах формируется микро-ручейковая сеть.

В результате моделирования рассчитываются следующие выходные параметры: густота речной сети; число, площади и длины водотоков различных порядков; коэффициенты масштабных изменений числа, длин и площадей потоков; число сформировавшихся речных систем.

Использование модели позволяет решать некоторые задачи, связанные с формированием систем водотоков на элементарных склонах.

В частности, к ним относятся: определение влияния размера ячейки расчетной сетки на характеристики структуры формирующихся сетей, оценка влияния критерия перехода от плоскостного стока к струйчатым потокам на характеристики структуры этих потоков, изучение влияния фактора всхолмленности поверхности склона на сложность систем микро-ручейков.

Размер ячейки определяет степень детализации возникающей ручейковой сети. Увеличение размера ячейки приводит к уменьшению числа ячеек и, следовательно, к уменьшению числа узлов слияния ручьев разного размера (рис. 2А). В результате также уменьшается максимальный порядок формируемых микро-ручейковых сетей.

Минимальный расход воды, при котором скорость потока достигает пороговых значений, соответствует началу возникновения струйчатых потоков и дает старт к формированию ручейковой сети первого типа [10]. Верхняя часть склона, где расходы воды меньше критической величины, является областью, на которой сток воды имеет исключительно плоскостной характер. При больших значениях критического расхода воды зона начала формирования ручейковой сети смещается вниз по склону при одновременном уменьшении ее густоты (она становится более разреженной (рис. 2В)).

Параметры смоделированных сетей зависят от величины  $\Delta_R$ , характеризующей в модели всхолмленность поверхности склона. Этот параметр определяет диапазон, в котором находится случайная знакопеременная прибавка к высоте каждой ячейки расчетной сетки высот. До начала моделирования предполагалось, что основное влияние этот фактор оказывает на число изолированных систем водотоков, образующихся в области формирования стока. Сопоставление расчетных значений числа ручейковых систем и изменяющейся величины  $\Delta_R$  (рис. 2Б) показывает, что связь между переменными носит сложный характер. При  $\Delta_R = 0.25 \div 0.75$  увеличение фактора всхолмленности приводит к небольшому уменьшению числа ручейковых систем, а при  $\Delta_R > 0.75$  оно, напротив, быстро возрастает.

Эта закономерность связана с особенностями формирования водных потоков на склонах. При близких к нулю значениях фактора всхолмленности рельеф склона представляет собой практически ровную наклонную поверхность. На ней формируется множество почти параллельных прямолинейных потоков, ориентированных по направлению к подножью склона (рис. 3А). Каждый из них образует отдельную изолированную систему ручейков. По мере возрастания  $\Delta_R$  увеличивается расчлененность рельефа и, как следствие, повышается вероятность слияния некоторых ручейковых потоков. Они образуют структуры, число которых меньше числа параллельных изолированных потоков (рис. 3Б). Дальнейшее увеличение  $\Delta_R$  приводит к образованию более расчлененного рельефа, к формированию все большего числа ручейковых систем, часто изолированных друг от друга (рис. 3В).

Результаты моделирования структуры ручейков на элементарном склоне позволяют определить степень ее подобию структуре постоянных водотоков. Для этого можно сопоставить масштабные коэффициенты изменения числа и длины водотоков, площадей водосборов для русловой, овражно-балочной и смоделированной микроручейковой сети (табл. 2). Эти коэффициенты соответствуют кратности изменения значений перечисленных характеристик водотоков при изменении порядков водотоков на единицу (с  $N$  до  $N + 1$  [14]).

В целом значения приведенных в таблице масштабных коэффициентов относительно близки по величине. При этом наиболее заметно значения коэффициентов смоделированных микроручейковых сетей отличаются от коэффициентов, определенных для существующих овражно-балочных сетей [9]. Что, возможно, обуславливается незавершенностью развития рассматриваемых овражно-балочных форм. Коэффициенты масштабного изменения площадей водосборов постоянных во-

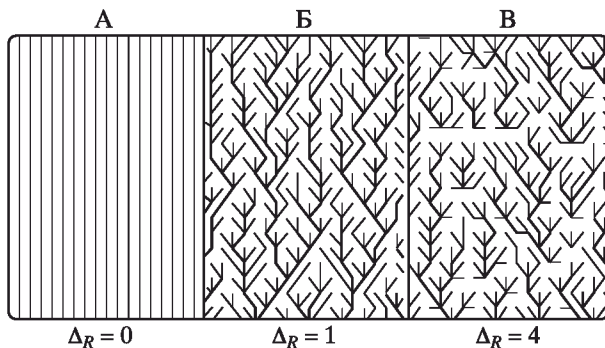


Рис. 3. Типы расчетных структур ручейков при различных значениях  $\Delta_R$

## Масштабные коэффициенты в различных звеньях водно-эрозионной сети

Подсистема водно-эрозионной сети	Масштабный коэффициент		
	число водотоков	площадь водосбора	длина
Русловая [6, 11]	0.25÷0.50	3.00	2.30
Овражно-балочная (по [9])	0.19÷0.37	3.40÷6.88	1.94÷2.18
Ручейковая (по результатам моделирования)	0.24	2.12	2.00

дотоков (3.00) и водотоков в овражно-балочной сети (3.40–6.88) несколько больше коэффициента, полученного по результатам моделирования систем ручейков на склонах (2.12).

## Заключение

Проведенное исследование показало, что разработанная математическая модель может быть использована для воспроизводства систем ручейков на элементарных склонах. Увеличение размера ячейки расчетной сетки модели приводит к уменьшению максимального порядка водотоков в смоделированных микроручейковых сетях. При больших значениях критического расхода воды  $Q_K$  зона начала формирования ручейковой сети смещается вниз по склону, а густота сети ручейков уменьшается. Густота ручейковой сети также зависит от всхолмленности рельефа. При  $\Delta_R > 0.75$  число ручейковых систем стабильно и быстро возрастает. Близкое совпадение значений масштабных коэффициентов изменения характеристик русловых, овражно-балочных и ручейковых сетей водотоков (временных и постоянных) свидетельствует о возможности использования для них общей системы кодирования, при которой порядок водотоков  $N$  будет изменяться в пределах  $0+1$  для ручейковой и овражно-балочной сети и до  $N \geq 1$  для систем постоянных водотоков (рек).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chorley R.J., Kennedy B.A.* Physical Geography: a Systems Approach. London: Prentice-Hall, 1971. 320 p.
2. *Маккавеев Н.И.* Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 346 с.
3. *Литвин Л.Ф.* География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2002. 255 с.
4. *Хортон Р.Е.* Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. М.: Изд-во иностр. лит, 1948. 158 с.
5. *Strahler A.N.* Hypsometric (area-altitude) analysis of erosial topography // *Geol. Soc. Amer. Bul.* 1952. V. 63. P. 1117–1142.
6. *Ржаницин Н.А.* Морфометрические и гидрологические закономерности строения речной сети. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 238 с.
7. *Шайдеггер А.Е.* Теоретическая геоморфология. М.: Прогресс, 1964. 450 с.
8. Малые реки волжского бассейна / Н.И. Алексеевский. М.: Изд-во МГУ, 1998. 234 с.
9. *Бондарев В.П., Зорина Е.Ф., Ковалев С.Н.* Гидролого-морфометрические характеристики овражно-балочных систем центра Русской равнины // *Геоморфология.* 2000. № 2. С. 52–58.
10. *Караушев А.В.* Общие и некоторые частные вопросы теории русловых процессов и склоновой эрозии // *Тр. ГГИ.* 1972. Вып. 191. С. 5–22.
11. *Нежиховский Р.А.* Русловая сеть бассейна и процесс формирования стока воды. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 446 с.
12. *Девдариани А.С.* Математические методы // *Итоги науки. Геоморфология.* 1966. Вып. 1. 151 с.
13. *Евстигнеев В.М.* Речной сток и гидрологические расчеты. М.: Изд-во МГУ, 1990. 304 с.

14. *Алексеевский Н.И., Айбулатов Д.Н., Косицкий А.Г.* Масштабные эффекты изменения стока в русловой сети территории // География, общество и окружающая среда / Динамика и взаимодействие атмосферы и гидросферы. М.: ИД “Городец”, 2004. Т. VI. С. 345–374.

ЗАО “Армада Софт”, Москва

Поступила в редакцию  
после доработки 17.01.2011

## **SLOPE RILL NET STRUCTURE MODELING**

**R.R. MURAKAEV**

### **Summary**

Mathematical simulation of ephemeral streams structure forming on the isolated hillslope is described. The networks of ephemeral streams formed under conditions of the uniform water inflow onto surface of the hillslope with randomly generated relief. Relationships between modeled streams network structure and input model parameters are studied. Coefficient values of stream parameters changes for river networks, gully networks and modeled ephemeral streams networks have been compared. Their closeness indicates that there exist general laws for forming ephemeral and constant streams systems on the surface of the Earth.