

Самоорганизуемая кризисность динамических систем и овражная эрозия.

Сидорчук А.Ю (sidor@yas.geogr.msu.su)

Московский Университет

Введение

В современном сильно специализированном естествознании не так уж много концепций, претендующих на всеобщность. Одной из таких концепций, сравнительно недавно сформулированной шведским физиком Пер Бэком [1], является концепция самоорганизуемой кризисности (СОК) больших сложных динамических систем. Открытая динамическая система находится в состоянии СОК, если при малых изменениях внешних условий происходят существенные изменения характеристик системы. Свойствами-индикаторами состояния СОК являются [1]: 1) степенная частотно - амплитудная функция основных пространственных и временных характеристик системы; 2) фрактальная размерность системы; 3) функция спектральной плотности системы типа «красного шума»; 4) «прерывистое равновесие» системы при долговременном функционировании. Классическим примером системы в состоянии СОК является горка гранул (песка, рисовых зерен, и т.п.), наращиваемая сверху. После превышения склонами горки угла естественного откоса по ним начинают сходить оползни самого разного размера, процесс этот характеризуется вышеуказанными свойствами. Состояние СОК было найдено для многих геофизических, геоморфологических (оползни), биологических и социальных систем, связанная с СОК библиография давно превысила 1000 наименований. Есть основание полагать, что многие другие геоморфологические системы обладают свойствами СОК, и тогда выявление самоорганизуемой кризисности в пространственно-временном функционировании геоморфологических систем может быть отнесено к одной из фундаментальных проблем динамической геоморфологии.

СОК для овражных систем

В рамках указанной проблемы одной из важнейших является задача о выявлении СОК в функционировании овражных систем. Представление об овраге, как о динамической саморазвивающейся системе, существует в современной динамической геоморфологии. Оно опирается на теорию устойчивого продольного и поперечного профиля оврага и на разработки по стадийности оврагообразования [2]. Эти подходы хорошо объясняют эволюцию отдельных оврагов на последней стадии их развития при затухании активного роста оврага. Однако их недостаточно для всестороннего освещения начальной стадии быстрого роста отдельных оврагов, а также длительной эволюции овражных систем с неоднократными этапами активизации и затухания. Именно эти вопросы можно решить в рамках представлений о СОК. Овраг в активной стадии развития и овражная система в целом полностью удовлетворяет

определению открытой динамической системы в состоянии СОК: достаточно малых количественных изменений внешних условий (природный или антропогенных) для сильных качественных изменений характеристик линейного эрозионного процесса, интенсивность которого длительное время самоподдерживается за счет обратных связей в системе.

Методы и подходы

Мы предполагаем, что овражные системы в целом, и отдельные овраги на активной стадии развития, находятся в состоянии СОК, а наиболее общие пространственно-временные закономерности их морфологии и динамики обладают свойствами СОК. Приведенная рабочая гипотеза определяет примененный методологический подход: свойства овражных систем сопоставляются со свойствами системы в состоянии СОК. Так как для этого требуются детальные измерения динамики оврагов с высоким разрешением во времени, исследованию подвергнута математическая модель динамики оврага [3], хорошо зарекомендовавшая себя при моделировании конкретных объектов [4, 5]. Моделируется три основных процесса: (1) врезание потока в дно оврага со скоростью, пропорциональной локальному уклону дна, при условии, что скорость потока больше критической; (2) расширение дна оврага до оптимальной величины при заданном расходе воды; (3) оползание бортов оврага при врезании на величину, большую критической, выполаживание бортов и аккумуляция продуктов оползания на днище оврага.

Использование математической модели позволило контролировать как тип процесса образования оврага, так и начальные/граничные условия. Выполнены расчеты развития оврага при следующих условиях: (1) начальный склон прямой, расход воды постоянный во времени, оползни на бортах оврага не формируются; (1а) то же, борта оврага подвержены оползанию; (2) начальный склон прямой, расход воды переменный во времени, оползни на бортах оврага не формируются; (2а) то же, борта оврага подвержены оползанию; В качестве природного аналога для модели принят овраг Мботма (Свазиленд, Южная Африка), для которого модель [3] была откалибрована [4, 5].

Результаты расчетов

Расчеты по сценарию (1) показали эволюцию продольного профиля линейной эрозионной формы только за счет донного врезания при идеальных начальных и граничных условиях. В этом случае модель [3] допускает аналитическое решение. В развитии эрозионной формы можно выделить короткую начальную стадию быстрого врезания и длительную стадию стабилизации. На обеих стадиях линия продольного профиля характеризуется эвклидовой размерностью 1, а ее эволюция во времени описывается нулевой спектральной плотностью и амплитудой. Отклонения численного решения от аналитического являются ошибками моделирования. Они невелики по амплитуде и характеризуются узкополосным спектром с максимумом при периодах 6-12 часов. Знание вида численной ошибки модели позволяет правильно интерпретировать результаты расчета при более сложных сценариях.

Расчеты по сценарию (1а) показали эволюцию продольного профиля линейной эрозионной формы за счет донного врезания и оползания бортов при идеальных начальных и граничных условиях. Наличие в модели оползней, которые возникают при врезании потока в дно оврага на глубину, более критической, резко изменило характер эволюции продольного профиля. В развитии оврага также выделяются начальная стадия быстрого врезания и стадия стабилизации (рис. 1а). На начальной стадии быстрого врезания продольный профиль оврага характеризуется фрактальной размерностью более 1 (рис. 1б), а изменение объема оврага во времени – функцией спектральной плотности типа «красный шум» (рис. 1в). Это полностью соответствует характеристикам открытой сложной динамической системы в состоянии СОК. На стадии стабилизации эти характеристики морфологии и динамики оврага исчезают: размерность линии продольного профиля снижается до 1, а функция спектральной плотности изменения объема оврага переходит в «синий шум». Это также соответствует предположениям теории: с потерей энергии «кризисность» системы уменьшается и она теряет атрибуты состояния СОК.

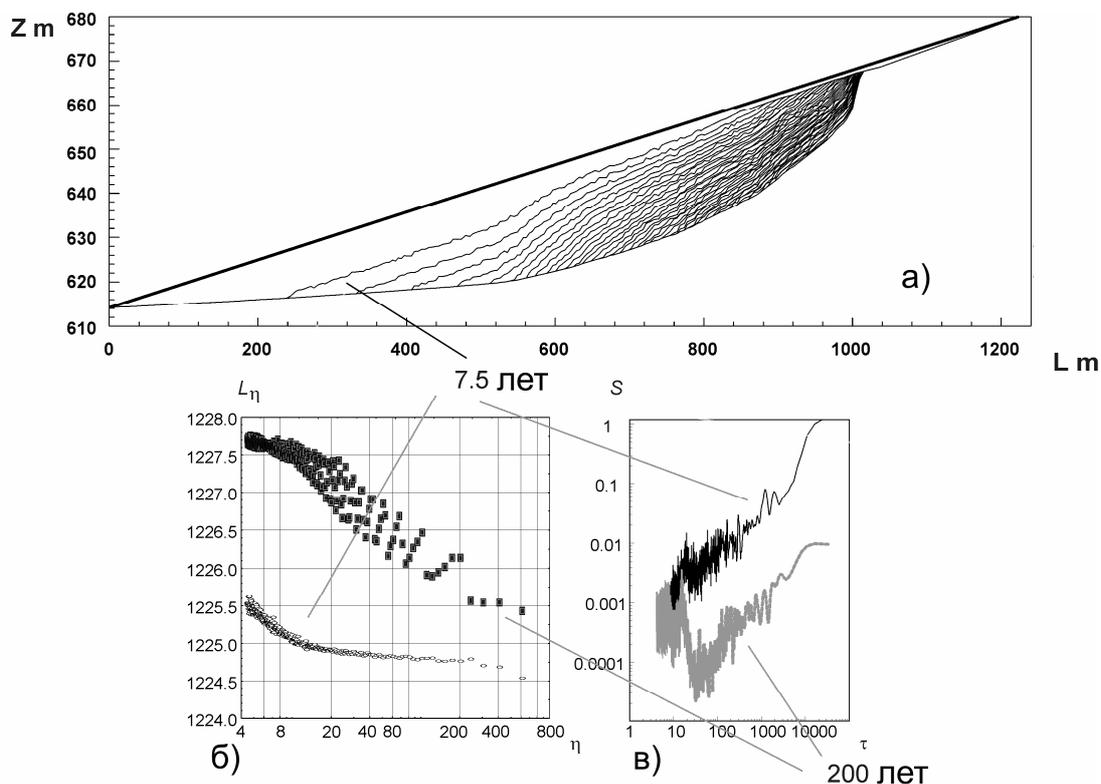


Рис. 1. Эволюция продольного профиля оврага (а), его размерности (б) и спектра изменения объема эрозии (в) по сценарию (1а).

Сценарий (2) отражает влияние переменных во времени граничных условий на эволюцию линейной эрозионной формы, которая развивается только за счет донного врезания. Так как эта модель характеризуется нулевым собственным спектром, функция спектральной плотности изменения объема эрозии во времени повторяет функцию спектральной плотности переменного расхода воды – «красный шум». Спектральные характеристики эрозионной системы

полностью контролируются характеристиками системы более высокого ранга – системы «водосбор – поверхностный сток». Одновременно в эволюции эрозионной формы выделяются обе стадии развития: быстрого врезания и стабилизации, длительность которых определяется саморазвитием эрозионной формы.

В сценарии (2а) исследуется влияние переменных граничных условий на эволюцию оврага, который развивается за счет донного врезания и оползания бортов. В этом случае модель обладает собственным спектром, несущим признаки СОК на стадии быстрого врезания и лишенного их на стадии стабилизации. В расчетах по сценарию (2а) происходит сложение этого спектра со спектром переменного расхода воды. В рассматриваемом нами случае изменчивость скорости эрозии за счет изменения расхода воды превышает изменчивость скорости эрозии за счет оползания бортов оврага. В результате спектр типа «красного шума» характеризует изменение объема эрозии во времени как на стадии быстрого врезания, так и на стадии стабилизации оврага.

Выводы

Численное моделирование эволюции оврага показывает, что в активной стадии эта саморазвивающаяся система обладает признаками открытой динамической системы в состоянии «самоорганизуемой кризисности»: фрактальностью и спектром типа «красный шум». При стабилизации оврага эти признаки исчезают: размерность системы перестает быть фрактальной, а ее спектральная функция преобразуется в «синий шум». Однако изменчивость гидрологической системы более высокого ранга (расхода воды), также обладающей признаками СОК, может затушевывать исчезновение признаков СОК на стадии стабилизации оврага. Это делает неоднозначным выделение стадий развития оврагов по признакам СОК.

Литература

1. Bak P. 1997. *How Nature Works: The Science of Self-organized Criticality*. Oxford University Press: Oxford.
2. Косов Б.Ф., Зорина Е.Ф., Любимов Б.П., Морякова Л.А., Никольская И.И., Прохорова С.Д. Овражная эрозия. М.: Изд-во МГУ, 1989. 168 с.
3. А.Ю. Сидорчук. Динамическая модель овражной эрозии. Геоморфология, № 4 1998.
4. Sidorchuk A, Marker M, Moretti S, Rodolfi G. 2001. Soil erosion modelling in the Mbuluzi river catchment (Swaziland, South Africa). *Geogr. Fis. Dynam. Quat* 24:177-187.
5. Sidorchuk Aleksey, Michael Märker, Sandro Moretti and Giuliano Rodolfi. Gully erosion modelling and landscape response in the Mbuluzi River catchment of Swaziland, CATENA, 2003, Volume 50, Issues 2-4, Pages 507-525