

УДК 631.559.551.57

А. В. Пяткова, преп.

Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова,
кафедра физической географии и природопользования
пер. Шампанский, 2, Одесса, 65058, Украина

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ФАКТОРОВ ВОДНОЙ ЭРОЗИИ ПОЧВ

Представлена разработка и ГИС-реализация модели смыва-аккумуляции почвы с учетом пространственной изменчивости факторов водной эрозии почв. Данная модель учитывает пространственную неоднородность гидрометеорологического фактора ливневого смыва, а также структуру временной гидрографической сети склоновых водосборов. С использованием данной модели выполнена оценка потенциальной эрозионной опасности для некоторых тестовых склоновых участков.

Ключевые слова: водная эрозия почв, пространственная изменчивость, гидрометеорологический фактор ливневого смыва, структура временной ручейковой сети на склонах, ГИС-реализация модели смыва-аккумуляции.

Введение

Эрозия почв на сегодня является наиболее распространенным видом их деградации. Этот процесс в большей или меньшей мере касается всех компонентов ландшафта, приводя в конечном итоге к опустыниванию территорий. Решение этой проблемы кроется в оптимизации использования эрозионноопасных земель, одним из условий которой является адекватная оценка эрозионной опасности территории. Трудность этой оценки заключается в том, что в результате эрозии происходит пространственная деградация почв, что приводит к формированию небольших по площади ареалов почв разной степени смытости, и это значительно усложняет их учет и оптимальное использование. В данной связи тема статьи представляется *актуальной*.

Целью настоящей работы является обоснование методики оценки смыва-аккумуляции почв на склонах с учетом пространственной изменчивости факторов водной эрозии, в частности гидрометеорологических условий и степени концентрации склоновых потоков. *Объектом* исследований являются эрозионноопасные земли (участки в зонах степи и лесостепи Украины). *Предмет* исследований — пространственная неоднородность гидрометеорологических условий смыва почвы и ее обусловленность, а также особенности структуры склонового стекания и их моделирование. Именно эти факторы чаще всего в эрозионных моделях приняты постоянными по всей территории (гидрометеорологические условия) или их учет слабо обоснован (степень концентрации склоновых водотоков).

Материалы и методы исследований

На сегодняшний день известны десятки математических моделей смыва почвы, разработанных для разных природных и хозяйственных условий. Наиболее

адекватной для условий степи и лесостепи Украины является логико-математическая модель, разработанная Г. И. Швевсом еще в 70-е годы [6]. В 90-е годы выполнена модификация и пространственная реализация этой модели, опираясь на существующий в то время уровень изученности пространственной структуры процесса эрозии и развития геоинформационных технологий [2].

Анализ логико-математической модели, наиболее полно приведенной в [2, 3, 4], показывает, что все ее составляющие характеризуются значительной пространственной изменчивостью. Современный уровень развития технологий исследований и моделирования, широкое внедрение геоинформационных систем и технологий в географию позволяет решить проблему учета этой изменчивости и выполнить оценку эрозионной опасности территории в интерактивном режиме, используя цифровые модели рельефа, а также современные методы пространственной интерполяции и математического моделирования.

Поскольку модель поверхностного склонового смыва-аккумуляции разработана для наиболее эрозионноопасных территорий Украины — степи и лесостепи, — то в ходе исследований использованы материалы наблюдений на агрометеорологических станциях, расположенных на этих территориях, а также цифровые модели рельефа участков, расположенных в пределах вышеуказанных зон.

Результаты исследований и их обсуждение

В моделях ливневого смыва зачастую противоэрозионные свойства почв, факторы агротехники и растительности принимают постоянными в пределах некоторых пространственных контуров (почвенных контуров, сельскохозяйственных полей, склонов и др.). Наиболее распространенным недостатком большинства моделей ливневого смыва почвы является принятие гидрометеорологических условий смыва (характеристик осадков, влажности почвы и др.) неизменными по всей исследуемой площади. Анализ выражений гидрометеорологического фактора ливневого смыва почвы ($K_{ГМ}$) в рамках логико-математической модели [2, 4] показывает, что определяющую роль в его пространственной неоднородности играет влажность верхнего слоя почвы, которая характеризуется значительной изменчивостью даже в пределах небольших участков [8]. Влажность верхнего слоя почвы в расчетных уравнениях $K_{ГМ}$ представлена индексом предшествующего увлажнения (B_0). По данным наблюдений за влажностью почвы на агрометеорологических станциях и постах степной и лесостепной зоны Украины, с использованием водно-физических характеристик почв этих зон получена зависимость между индексом предшествующего увлажнения и гидрометеорологическим фактором ливневого смыва почв (рис. 1).

Тесная связь между индексом B_0 и влажностью почвы, а также ее водно-физическими характеристиками позволила найти территориально общую зависимость между $K_{ГМ}$ и влажностью почвы [5]:

$$K_{ГМ} = 0,45 K_{ГМз} \left(59,2 \left(\frac{W - W_{мг}}{W_{нг} - W_{мг}} \right)^2 + \frac{71,3 - W_{мг}}{4,08} \right)^{0,3}, \quad (1)$$

где $K_{ГМ}$ — гидрометеорологический фактор ливневого смыва почвы; $K_{ГМз}$ — среднее значение нормы гидрометеорологического фактора в пределах данной природной зоны (характерное для плакоров); W — пространственное распределение

влажности верхнего (0,5 м) слоя почвы, мм; $W_{\text{мг}}$ — максимальная гигроскопичность почвы; $W_{\text{нв}}$ — наименьшая полевая влагемкость почвы.

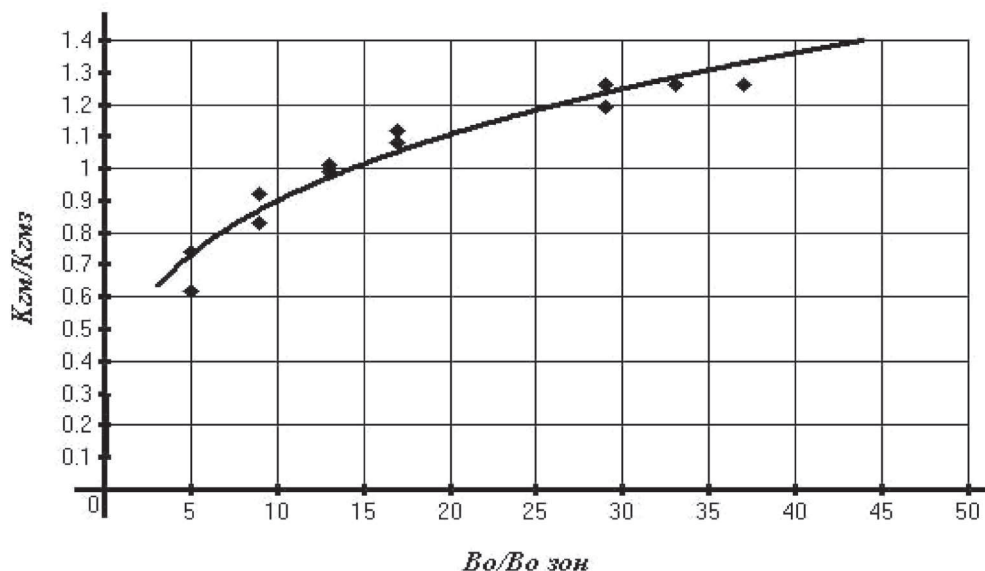


Рис. 1. График связи гидрометеорологического фактора ливневого смыва почвы и индекса предшествующего увлажнения

$K_{\text{зм}}$ — норма гидрометеорологического фактора; $K_{\text{зм3}}$ — среднее значение нормы гидрометеорологического фактора; B_0 — индекс предшествующего увлажнения; $B_{0 \text{ зон}}$ — среднее значение индекса предшествующего увлажнения

Пространственное распределение влажности почвы предлагается определять согласно модели, представленной в [8].

Двумерная реализация модели смыва-аккумуляции требует учета структуры склонового стекания — концентрации или рассеивания временных склоновых водотоков.

Известно, что склоновый поверхностный сток формируется в пределах временных склоновых водосборов, которые возникают после выпадения интенсивного ливня, таяния снега или в результате орошения. В зависимости от формы склона в плане временные ручейки текут по склону либо параллельно (прямой склон), либо концентрируются (собирающий склон), либо расходятся под углом друг к другу (рассеивающий склон). С точки зрения развития эрозии наиболее неблагоприятными являются собирающие склоны.

В рамках базового варианта логико-математической модели смыва почвы [4, 7, 6] ее автором — Г. И. Швобсом — предложено использовать величину L' (приведенную длину), которая вычисляется по формуле

$$L' = 0,5 L \left(\frac{B_0}{B_L} + 1 \right), \quad (2)$$

где B_0 — ширина склона по водоразделу; B_L — ширина склона на расстоянии L от водораздела, которая находится по соотношению

$$B_L = B_0 + \frac{L}{L_c}(B_{Lc} - B_0), \quad (3)$$

где L_c — полная длина склона; B_{Lc} — ширина склона на расстоянии L_c от водораздела (то есть по нижнему краю склона).

В соответствии с выражением (3) для прямых склонов $B_0 = B_L$, а приведенная длина L' равняется фактической длине склона L , для рассеивающих склонов $B_0 < B_L$, а $L' < L$, для собирающих склонов $B_0 > B_L$ и $L' > L$ (рис. 2).

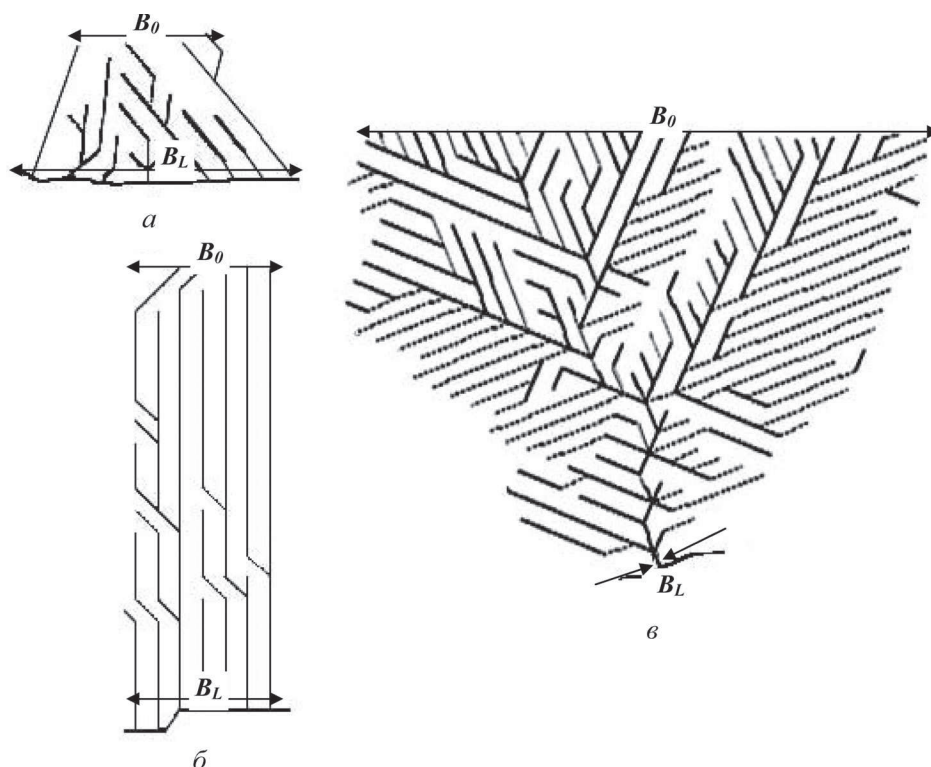


Рис. 2. Схема разных в плане склонов

a — рассеивающий склон, ширина склона по водоразделу (B_0) меньше ширины склона у подошвы B_L ; b — прямой склон, $B_0 = B_L$; v — собирающий склон, $B_0 > B_L$

В рамках пространственного моделирования смыва почвы, при котором величина смыва-аккумуляции оценивается для каждой точки поверхности (каждой ячейки раstra, которая имеет свой водосборный бассейн — микроводосбор — с различной в плане формой), формула (2) требует корректировки, поскольку в нижней части собирающих склонов отношение B_0/B_L стремится к бесконечности, а формула (2) теряет свой смысл. Поэтому требуется несколько иной подход к определению условий концентрации склоновых водотоков.

Исходя из того, что физико-статистические модели, в том числе и логико-математическая модель [7], разработаны на основе данных наблюдений на стоковых площадках постоянной ширины с выровненной поверхностью, т. е. без поперечной концентрации склонового стекания, степень концентрации или

рассеивания склоновых потоков может быть учтена по степени развития их микроводосборов, под которой в данном случае подразумевается отклонение ширины склонового водосбора заданной длины от некоторой средней величины, характерной для данных геоморфологических, почвенно-климатических и хозяйственных условий. Характеристикой степени концентрации склонового стекания будет отношение ширины данного склонового водосбора (B) к ширине среднего («эталонного») водосбора (B_{em}). Это отношение в зависимости от структуры склонового стекания может быть как больше единицы (повышенная концентрация водотоков на собирающих склонах), так и меньше единицы (рассеивание стока на расходящихся склонах).

Склоновые микроводосборы характеризуются определенными геометрическими параметрами — длиной, шириной, площадью. Эти параметры находятся в определенной связи друг с другом. Результаты обобщения данных по морфологии речных бассейнов бывшего СССР и США позволили в [1] получить уравнение связи между площадью бассейна и его длиной.

Склоновые микроводосборы имеют схожую с речными водосборами структуру. Но при этом длина потоков ограничена длиной склона, скорость потоков обусловлена более значительной горизонтальной составляющей силы тяжести, которая определяется относительно большей величиной падения их русла, потоки имеют временный характер, а сток в пределах водосборов осуществляется непосредственно от водоразделов. Склоновые водосборы по сравнению с речными бассейнами имеют более упрощенную структуру. При этом можно предположить, что в пределах склоновых водосборов также существует связь между их длиной и площадью. Установив характер связи между этими параметрами, можно найти среднюю ширину склоновых микроводосборов, которую можно считать эталонной для данных условий.

Исследования производных от цифровых моделей рельефа карт длин линий тока и площадей микроводосборов для различных участков в пределах степи и лесостепи Украины, выполненные с использованием геоинформационных технологий, позволили получить совокупность данных, которые расположены в координатной плоскости так, как показано на рис. 3. Область точек на рис. 3 отображает зависимость площадей микроводосборов от их длин.

Уравнение регрессии, отражающее эту зависимость, позволяет определить площадь микроводосбора при заданной его длине:

$$F = 0,16 \cdot L^3 + 0,008 \cdot L^2 + 0,007 \cdot L, \quad (4)$$

где F — площадь склонового микроводосбора, км²; L — длина склонового микроводосбора, км.

Площадь, определенная по уравнению (4), и является площадью эталонного склонового водосбора, сформировавшегося при данных климатических и почвенно-геоморфологических условиях. Имея площадь эталонного водосбора и его длину, можно определить и его ширину (B_{em}).

Определение ширины микроводосбора (B) в заданной точке пространства (ячейке растра) является задачей, решаемой в среде любого стандартного ГИС-пакета, поддерживающего функции анализа цифровых моделей рельефа.

Отношение ширины микроводосбора (B) к ширине эталонного микроводосбора (B_{em}) при данных условиях и представляет собой количественный показатель, характеризующий структуру склонового стекания — коэффициент концентрации склоновых водотоков K_c .

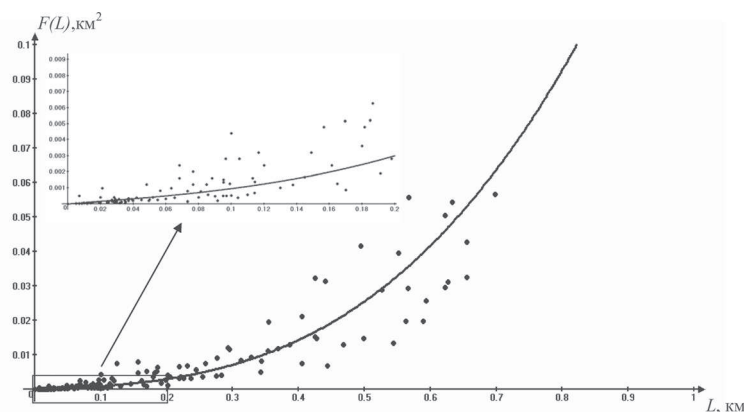


Рис. 3. График связи площади склоновых микроводосборов и их длины

Пространственная реализация модели смыва-аккумуляции почвы выполнена в среде пакета *PCRaster* с привлечением программного языка *Basic*. Учет пространственной неоднородности противоэрозионной стойкости почв, агротехники и растительности осуществляется путем осреднения этих факторов в пределах склоновых микроводосборов, замыкающим створом которых является каждая ячейка раstra поочередно.

Входными данными для расчетов с использованием пространственной модели смыва-аккумуляции является гидрологически корректная цифровая модель рельефа, карта почв с выделенными на ней контурами эродированности, значения влажности и нормы гидрометеорологического фактора на водоразделе, карта землепользования. Результатом расчетов являются растровые карты исследуемых территорий, отображающие пространственную изменчивость смыва-аккумуляции (рис. 4).

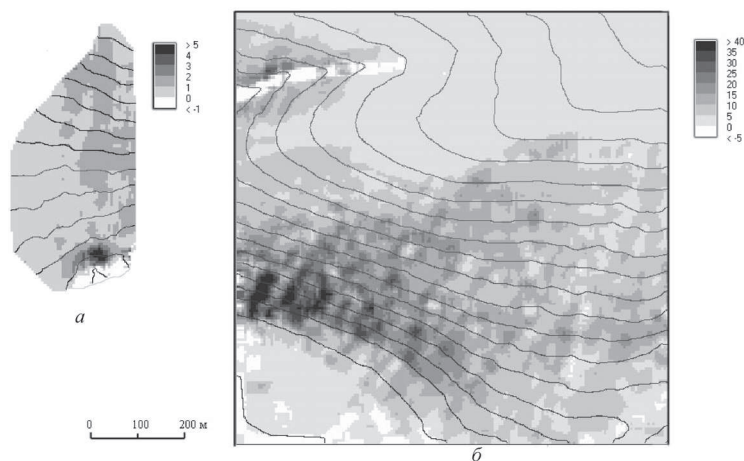


Рис. 4. Пространственное распределение расчетного смыва почвы в пределах двух склоновых участков (в т/га/год):

a — лог Плоский (верховья балки в бассейне р. Бутеня, юг Киевской области, зона лесостепи; *б* — участок Банновка, склон р. Катлабух, юг Одесской области, зона степи

Использование пространственно реализованного варианта модели смыва-аккумуляции почв дает возможность дифференцированно оценивать существующую эрозионную опасность территории в пределах даже очень ограниченных площадей и предполагает поиск математически и географически обоснованных путей решения этой проблемы.

Выводы

1. Гидрометеорологический фактор ливневого смыва почвы характеризуется значительной пространственной изменчивостью, которая, главным образом, определяется влажностью верхнего слоя почвы.

2. Концентрация склоновых водотоков может быть выражена степенью развития склоновых микроводосборов.

3. С учетом пространственной изменчивости факторов водной эрозии почв, а также концентрации поверхностного стока реализована пространственная модель смыва-аккумуляции, которая позволит дифференцированно подходить к оптимизации использованию эрозионноопасных земель.

Литература

1. *Нежиховский Р. А.* Русловая сеть бассейна и процесс формирования стока воды. — Л.: Гидрометеорологиздат, 1971. — 474 с.
2. *Світличний О. О.* Кількісна оцінка характеристик схилового ерозійного процесу і питання оптимізації використання ерозійно-небезпечних земель: Автореф. дис... д-ра геогр. наук. — Одеса, 1995. — 47 с.
3. *Светличный А. А.* Принципы совершенствования эмпирических моделей смыва почвы // Почвоведение. — № 8. — 1999. — С. 1015–1023.
4. *Светличный А. А., Черный С. Г., Швец Г. И.* Эрозиоведение: теоретические и прикладные аспекты. — Сумы: Университетская книга, 2004. — 410 с.
5. *Світличний О. О., Іванова А. В.* Принципи просторового моделювання гідрометеорологічних умов зливогого змиву ґрунту // Вісник ОНУ. Географічні та геологічні науки — Т. 8, вип. 5. — 2004. — С. 77–82.
6. *Швец Г. И.* Теоретические основы эрозиоведения. — К.; Одесса: Выща школа, 1981. — 223 с.
7. *Швец Г. И.* Формирование водной эрозии, стока наносов и их оценка. — Ленинград: Гидрометеорологиздат, 1974. — 184 с.
8. *Svetlitchnyi A. A., Plotnitskiy S. V., Stepovaya O. Y.* Spatial distribution of soil moisture content within catchments and its modeling on the basis of topographic data // Journal of Hydrology. — Vol. 277. — 2003. — P. 50–60.

А. В. П'яткова

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,
кафедра фізичної географії і природокористування
пер. Шампанський, 2, Одеса, 65058, Україна

ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВОЇ МІНЛИВОСТІ ФАКТОРІВ ВОДНОЇ ЕРОЗІЇ ҐРУНТІВ

Резюме

Подано розробку і ГІС-реалізацію моделі змиву-аккумуляції ґрунту з урахуванням просторової мінливості факторів водної ерозії ґрунтів. Дана модель враховує просторову неоднорідність гідрометеорологічного фактора зливогого змиву, структуру тимчасово-

вої гідрографічної сітки схилових водозборів. З використанням даної моделі виконана оцінка потенційної ерозійної небезпеки для тестових схилових ділянок.

Ключові слова: водна ерозія ґрунту, просторова неоднорідність, гідрометеорологічний фактор зливового змиву, структура тимчасової струмкової сітки, ГІС-реалізація моделі змиву-аккумуляції.

A. V. Pyatkova

Odessa National Mechnikov's University,
Department of Physical Geography and Nature Resource Usage,
Shampanskiy lane, 2, Odessa, 65058, Ukraine

FEATURES OF MODELLING OF SPATIAL CHANGEABILITY OF FACTORS OF SOIL EROSION

Summary

Development and GIS-realization of the model of soil washing off and accumulation is represented taking into account spatial changeability of soil erosion factors. The given model takes into account spatial heterogeneity of hydrometeorological factor of the thundershower washing off and structure of temporal network of slope subcatchments. With the use of the given model there is the executed estimation of potential erosion danger for the test slope areas.

Keywords: water soil erosion, spatial heterogeneity, hydrometeorological factor of thundershower washing off, structure of temporal rill network within slopes, GIS-realization of model of washing off and accumulation.