

ляє будувати оціночні моделі різного ступеня складності. В тому числі оцінка небезпек природних та техногенних надзвичайних ситуацій є важливим завданням, яке потребує вирішення на основі використання географічних даних. Інтелектуальний аналіз факторної моделі небезпеки виникнення природних пожеж показав доцільність та ефективність ви-

користання операцій інтерполяції растрових поверхонь та їх подальшого аналізу за допомогою методів перекласифікації, нормалізації, зваженого числення та зональної статистики, що надає змогу отримання кількісної оцінки показника небезпек природного характеру.

Рецензент: д. геогр. н., проф. Л. М. Даценко

### Література:

1. Колодяжний О. А. Організація космічного моніторингу пожеж / О. А. Колодяжний, Е. Luhmann, А. Г. Машковський, Л. С. Потапенко, Ю. М. Штепа // Космічна наука і технологія. — [т.8, №2-3]. — 2002. — С. 246-248.
2. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2011 році. — К.: Міністерство екології та природних ресурсів України, LAT&K, 2012. — 258 с.
3. Ясинский Ф. Н. Прогнозирование вероятности возникновения лесных пожаров с помощью нейросетевого алгоритма на многопроцессорной вычислительной технике/ Ф. Н. Ясинский, О. В. Потёмкина, С. Г. Сидоров, А. В. Евсеева // Вестник ИГЭУ. — [Вып. 2]. — 2011. — С. 1- 4.
4. Atlas of natural hazards & risks of Georgia // Caucasus Environmental NGO Network, 2012 [Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://drm.cenn.org/index.php/en/>
5. Christopher B. Oneal, John D. Stuart, Steven J. Steinberg, Geographic analysis of natural fire rotation in the California redwood forest during the suppression era [Електронний ресурс] // Fire Ecology, Volume02, Issue01, Spring, 2006. — Режим доступу : <http://fireecology.org/docs/Journal/pdf/Volume02/Issue01/073.pdf>
6. Radmila Jovanovic, Zeljko Bjeljic, Olgica Miljkovic, Aleksandra Terzic Spatial analysis and mapping of fire risk zones and vulnerability assessment — case study mt. Stara Planina [Електронний ресурс] // Prevention and Education in Natural Disasters, 2013. — Режим доступу : <http://www.doiserbia.nb.rs/img/doi/0350-7599/2013/0350-75991303213J.pdf>

УДК 911.9:631.459.21

А. А. Светличный, А. В. Пяткова

Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова

## ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДНОЙ ЭРОЗИИ ПОЧВ

Рассмотрена проблема пространственного моделирования водной эрозии почвы как основы оптимизации эрозионной геосистемы агроландшафта. Представлена разработка реализованной с использованием аналитических возможностей ГИС-пакета PCRaster (Нидерланды) и языка программирования Visual Basic пространственной физико-статистической математической модели смыва-аккумуляции почвы, учитывающая пространственную неоднородность всех факторов водной эрозии. Пространственное моделирование смыва почвы с использованием модели проиллюстрировано на примере экспериментального водосбора Грачева Лощина (Курская область).

**Ключевые слова:** смыв-аккумуляция почвы, пространственная модель, ГИС-реализация, PCRaster.

О. О. Світличний, А. В. П'яткова

### ГЕОІНФОРМАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВОДНОЇ ЕРОЗІЇ ҐРУНТІВ

Розглянуто проблему просторового моделювання водної ерозії ґрунту як основи оптимізації ерозійної геосистеми агроландшафту. Представлено розробку реалізованої з використанням аналітичних можливостей ГІС-пакету PCRaster (Нідерланди) та мови програмування Visual Basic просторової фізико-статистичної математичної моделі змиву-аккумуляції ґрунту, яка враховує просторову неоднорідність всіх факторів водної ерозії. Просторове моделювання змиву ґрунту з використанням моделі проілюстровано на прикладі експериментального водозбору Грачова Лощина (Курська область).

**Ключові слова:** змив-аккумуляція ґрунту, просторова модель, ГІС-реалізація, PCRaster.

A. A. Svetlitchnyi, A. V. Pyatkova

### GIS MODELING OF WATER EROSION OF SOIL

The problem of spatial modeling of water soil erosion as the bases of optimization of erosive geosystem of agrolandscape is considered. The development of the spatial physical and statistical mathematical model of the soil washing-accumulation is presented. The model is realized with the use of analytical possibilities of GIS-package of PCRaster (Netherlands) and programming of Visual Basic language. The model is taking into account spatial heterogeneity of all factors of water soil erosion. The spatial design of the soil washing off with the use of model is illustrated on the example of experimental basin of Gracheva Dale (Kursk region).

**Keywords:** washing-accumulation of the soil, spatial model, GIS-realization, PCRaster.

**Введение.** Проблема деградации почв в результате интенсификации водной эрозии является одной из наиболее актуальных проблем современности, становясь причиной больших убытков в сельском хозяйстве и в целом угрожая безопасному развитию цивилизации.

В Украине потери продукции земледелия от эрозии колеблются в пределах 9-12 млн. т зерновых единиц ежегодно. Среднегодовой расчетный смыв почвы с пахотных земель в Украине составляет свыше 15 т/га, среднегодовые потери гумуса при этом достигают 0,5 т/га, питательных веществ – 0,6 т/га, что не компенсируется внесением удобрений [1].

Общая площадь сельскохозяйственных угодий, которые подвержены губительному влиянию водной эрозии, составляет в стране 13,3 млн га (32% общей площади), в т.ч. 10,6 млн га пахотных земель, и продолжает увеличиваться. В составе эродированных земель насчитывается 4,5 млн га с сильно- и средне-смытыми почвами, 68 тыс. га полностью потеряли гумусовый горизонт.

Одной из важнейших составляющих решения проблемы эрозионной деградации агроландшафтов является разработка адекватной математической модели эрозионных потерь почвы, учитывающей влияние основных природных и хозяйственных факторов. Используемые или используемые в стране математические модели смыва (или эрозионных потерь) почвы (USLE/RUSLE, 1958-1989; Г. И. Швевса, 1974, 1981; И. К. Срибно, 1977, 1993; Г. П. Сурмача, 1979-1982; А. Б. Лавровского и др., 1987 и некоторые другие), не учитывающие пространственное изменение факторов водной эрозии и недостаточно адекватно учитывающие влияние, по крайней мере, некоторых из них [1], уже не удовлетворяют современным требованиям. Учитывая современный уровень исследований склонового водно-эрозионного процесса, выраженный пространственно-распределенный характер как природных, так и хозяйственных факторов водной эрозии почв, современные подходы к оптимизации эрозионной геосистемы агроландшафта на основе адаптивно-ландшафтных систем земледелия (контурно-мелиоративной, ландшафтно-экологической, точной), необходим именно геоинформационный подход к моделированию, расчету и прогнозу характеристик склонового эрозион-

ного процесса, опирающийся на адекватную математическую модель смыва-аккумуляции. При этом такая математическая модель должна опираться на стандартную и общедоступную информацию, иначе возможный диапазон ее применения будет слишком узким. В соответствии с классификацией математических моделей водной эрозии почв [2] такая модель должна относиться к эмпирическим физико-статистическим либо концептуальным моделям.

#### Изложение основного материала

**Материалы и методы.** В качестве основы для разработки пространственно-распределенной модели смыва-аккумуляции почвы использована наиболее теоретически обоснованная и информационно обеспеченная для природно-хозяйственных условий Украины логико-математическая модель эрозионных потерь почвы Г. И. Швевса (1974, 1981). На основе теоретических и полевых исследований склонового эрозионно-аккумулятивного процесса, выполненных в последние два десятилетия, разработана ее модификация, представляющая собой физико-статистическую модель смыва-аккумуляции почвы, отвечающую сформулированным выше требованиям: она учитывает диалектическое единство процессов смыва и аккумуляции на склоне, ярко выраженный неустановившийся характер ливневого наносообразования и пространственную изменчивость всех факторов эрозии, в том числе и пространственную структуру склонового стекания.

Профильная (1D) и пространственная (2D) ГИС-реализация модели выполнены с использованием аналитических возможностей пакета моделирования окружающей среды *PCRaster* [3] и языка программирования *Visual Basic*. Широкие возможности языка моделирования пакета *PCRaster* позволяют создавать достаточно широкий класс моделей, в том числе физически обоснованные модели процессов окружающей среды такие, как модели поверхностного стока, водной эрозии, транспорта загрязняющих веществ и др. Интеграция пакета с языками программирования расширяют его аналитические и операционные возможности.

**Результаты и их анализ.** Расчетные уравнения пространственной версии логико-математической модели эрозионных потерь почвы имеют вид:

при  $x \leq L_a$

$$\begin{aligned}
 W_{\text{л}}(i, j) = & 2,6 \cdot 10^{-6} \left[ \left( 1 + 0,5 \left( \frac{x'}{x} \right)^{0,5} \right) K_{\text{ГМ}}(i, j) j_{\text{R}}(i, j) I^m(i, j) f_a(i, j) x^{0,5} + \right. \\
 & + K_{\text{ГМ}}(i, j) j_{\text{R}}(i, j) I^m(i, j) \frac{df_a(i, j)}{dn} x + K_{\text{ГМ}}(i, j) j_{\text{R}}(i, j) \frac{dI^m(i, j)}{dn} f_a(i, j) x + \\
 & + K_{\text{ГМ}}(i, j) \frac{dj_{\text{R}}(i, j)}{dn} I^m(i, j) f_a(i, j) x + \frac{dK_{\text{ГМ}}(i, j)}{dn} j_{\text{R}}(i, j) I^m(i, j) f_a(i, j) x + \\
 & \left. + K_{\text{ГМ}}(i, j) j_{\text{R}}(i, j) I^m(i, j) f_a(i, j) x \frac{d(x'^{0,5})}{dn} \right], \quad (1)
 \end{aligned}$$

при  $x > L_a$

$$\begin{aligned}
 W_{\Delta}(i, j) = & 2,6 \cdot 10^{-6} \left[ \left( 1 + 0,5 \left( \frac{x'}{x} \right)^{0,5} \right) K_{ГМ}(i, j) j_R(i, j) I^m(i, j) f_a(i, j) L_{\Delta}^{0,5} + \right. \\
 & + K_{ГМ}(i, j) j_R(i, j) I^m(i, j) \frac{df_a(i, j)}{dn} x^{1,5} + K_{ГМ}(i, j) j_R(i, j) \frac{dI^m(i, j)}{dn} f_a(i, j) x^{1,5} + \\
 & + K_{ГМ}(i, j) \frac{dj_R(i, j)}{dn} I^m(i, j) f_a(i, j) x^{1,5} + \frac{dK_{ГМ}(i, j)}{dn} j_R(i, j) I^m(i, j) f_a(i, j) x^{1,5} + \\
 & \left. + K_{ГМ}(i, j) j_R(i, j) I^m(i, j) f_a(i, j) x^{1,5} \frac{d(x'^{0,5})}{dn} \right],
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$L_a = 0,854 k_v m_c^{3/2} (r_{rP\%} \varphi b_c I)^{1/2}, \tag{3}$$

где  $W_A(i, j)$  — модуль ливневого смыва почвы (т/га) в точке пространства (ячейке раstra) с координатами  $(i, j)$ ;  $x$  — расстояние от водораздела до данной ячейки по линии тока воды, м;  $x'$  — приведенное расстояние от водораздела до данной ячейки,  $x' = 0,5x (K_p(i, j) + 1)$ , где  $K_p$  — коэффициент формы склоновых водосборов, безразм.;  $L_a$  — длина зоны активного наносообразования, примыкающей к водоразделу (м);  $K_{ГМ}(i, j)$  — среднее в пределах склонового водосбора ячейки  $(i, j)$  значение гидрометеорологического фактора ливневого смыва почвы;  $f_a(i, j)$  — среднее в пределах склонового водосбора ячейки  $(i, j)$  значение фактора агротехники, безразм.;  $j_R(i, j)$  — среднее в пределах склонового водосбора ячейки  $(i, j)$  значение характеристики относительной смываемости почв, безразм.;  $L_a$  — рабочая длина зоны активного наносообразования, в качестве

которой принимается примыкающий сверху к расчетной ячейке участок склона длиной  $L_a$ , м;  $I(i, j)$  — средний в пределах склонового водосбора ячейки  $(i, j)$  уклон склона, %;  $m$  — показатель степени при уклоне;  $k_v$  — коэффициент форсировки, учитывающий различие скоростей добегаания волны стока и движения материальной точки, в среднем равный 1,5;  $m_c$  — коэффициент шероховатости поверхности склона;  $r_{r, P\%}$  — наибольшая средняя за время активного наносообразования  $t$  (мин) интенсивность дождя (мм/мин) расчетной обеспеченности  $P\%$ ;  $\varphi$  — коэффициент стока, безразм.;  $b_c$  — средняя ширина водосборов временной ручейковой сети, м. Переменные  $m_c, \varphi, I, b_c$  в выражении (3) относятся к части склона длиной  $L_a$ .

В рамках данной модели впервые решена задача оценки пространственной изменчивости в пре-

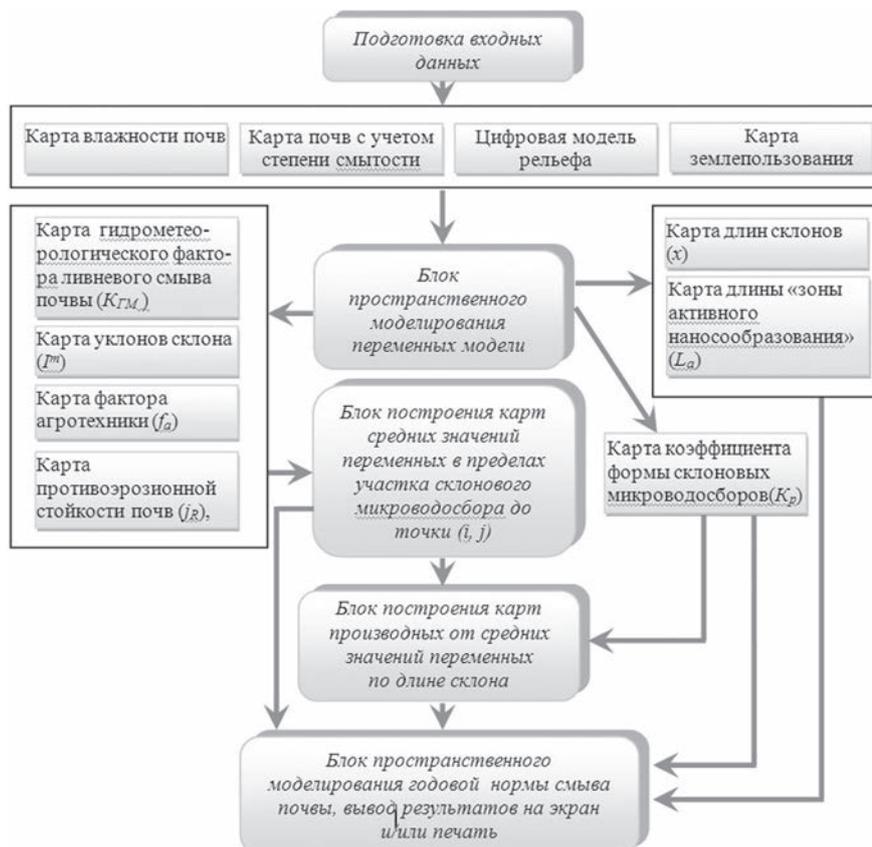


Рис. 1. Блок-схема ГИС-реализованной пространственной модели расчета нормы смыва почвы

делах склона гидрометеорологического фактора ливневого смыва [4], пространственной структуры склонового стекания [5], выполнены исследования внутрисклоновой изменчивости противозерозионных свойств почв и предложена методика ее геоинформационного моделирования [6].

Представленная модель в отличие от других эмпирических моделей смыва почвы позволяет учесть пространственную изменчивость всех факторов водной эрозии почв — гидрометеорологических условий, характеристик почв, рельефа и агротехники, что дает возможность рассчитывать норму ливневого, весеннего и суммарного смыва для небольших по площади земельных участков (полей севооборотов, фермерских хозяйств, отдельных склонов), учитывая особенности природных и хозяйственных условий в их пределах. Такой подход к оценке смыва почвы позволяет выявлять наиболее эрозионноопасные участки земель, рационально организовывать территорию, выделять агроэкологические группы земель, разрабатывать севообороты, внедрять современные системы земледелия, давать землям обоснованную оценку.

ГИС-реализация модели представляет собой систему последовательно связанных блоков, позволяющих рассчитывать пространственное распределение каждого фактора водной эрозии почв, их производных по длине склона и, в итоге, норму ливневого, весеннего и суммарного смыва почвы для разных территорий (рис. 1).

Пространственно-распределенными входными данными модели являются гидрологически корректная цифровая GRID-модель рельефа (ЦМР), цифровая карта почв с обязательной идентификацией контуров эродированности и цифровая карта землепользования с границами севооборотных участков и противозерозионными мероприятиями, а также цифровая растровая карта пространственного распределения влажности почвы, рассчитываемая с использованием модели [7].

К атрибутивной (непространственной) входной информации модели относятся значения влажности верхнего полуметрового слоя почвы по данным наблюдений на ближайшей метеостанции и зональные значения гидрометеорологических факторов ливневого и весеннего смыва почвы.

Расчет переменных модели смыва подразумевает полностью автоматизированный расчет карт

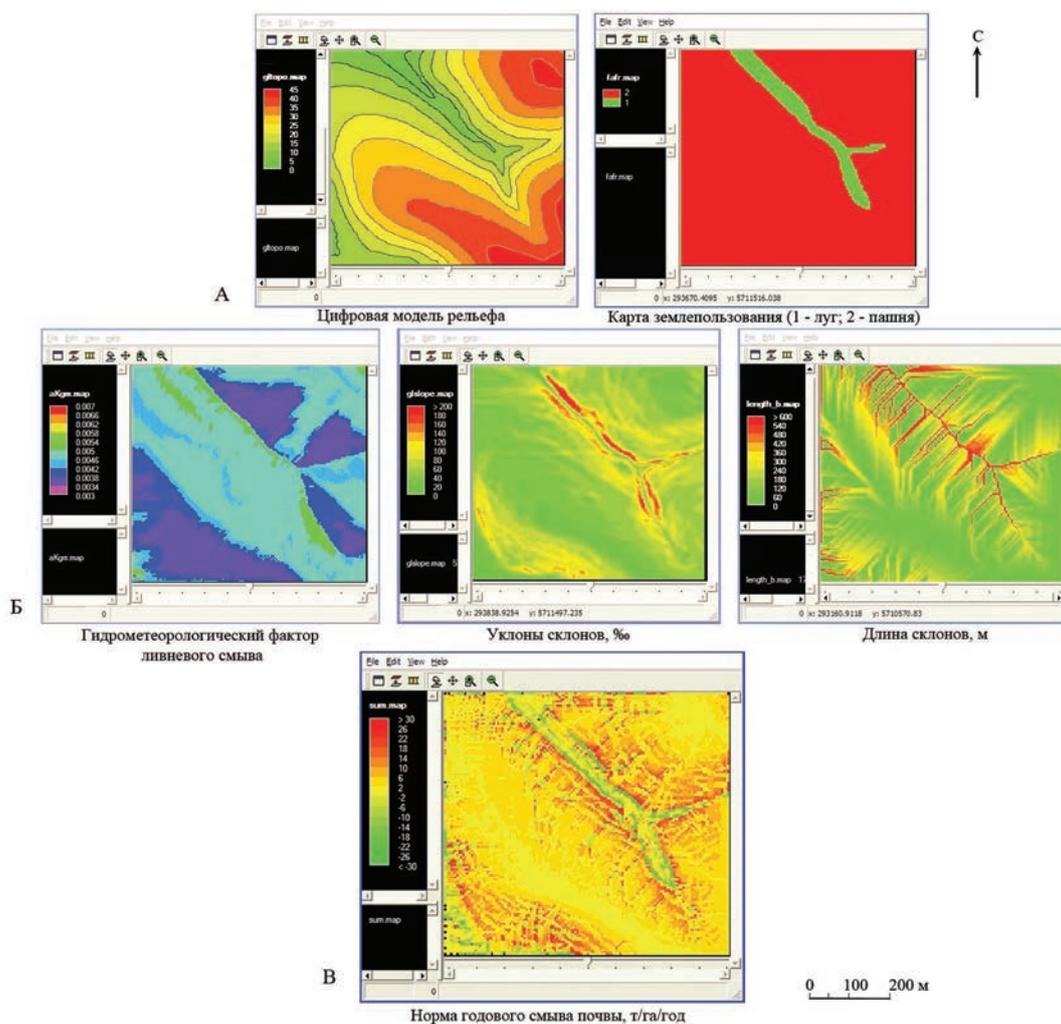


Рис. 2. Цифровые входные (А), некоторые промежуточные (Б) и результирующая (В) карты расчета нормы смыва почвы в пределах нижней части водосбора Грачева Лощина

отдельных факторов эрозии с использованием входных данных для рассматриваемой территории. Расчетные значения переменных для каждой ячейки растра определяются как средние арифметические для ее вышележащего склонового водосбора.

Расчет участвующих в формулах (1)- (2) производных по длине склона выполняется с использованием аналитических возможностей пакета *PCRaster* и особого алгоритма учета степени влияния изменений факторов эрозии по длине склона на расчетный смыв почвы [7].

Модель верифицирована по данным наблюдений на склоновых водосборах Богуславской полевой гидрометеорологической станции и результатов полевых исследований смыва-аккумуляции методом радиоуглеродного и магнитного трассеров, проведенных сотрудниками Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова в течение 1987 – 2007 гг. [8].

На рис. 2 представлены некоторые карты расчета нормы смыва почвы для приустьевой части водосбора Грачева Лощина (Курская область) площадью около 180 га, расположенного на территории опытно-производственного хозяйства ВНИИЗиЗПЭ.

Цифровая модель рельефа балки, основа создания программными средствами ГИС-пакета карт уклонов, экспозиций, продольной и поперечной кривизны склонов, построена на основе бумажной карты рельефа масштаба 1:10000 с сечением рельефа 1 м. Для оцифровки горизонталей рельефа и координатной привязки использован ГИС-пакет *MapInfo Professional 6.0*. Пространственная интерполяция и построение ЦМР выполнена методом обыкновенного точечного кригинга в среде программного модуля *Gstat*, являющегося частью пакета *PCRaster*. Цифровая почвенная карта построена в среде ГИС-пакета *MapInfo Professional 6.0* в векторном формате, после чего конвертирована в растровый формат пакета *PCRaster*. Размер растра цифровых карт 140x130, размер ячейки растра 10 м.

Переменными модели смыва почвы, представленными на рис. 2, являются длина склонов, а также уклоны склонов и гидрометеорологический фактор ливневого смыва почвы, рассчитанные как средние в пределах склоновых водосборов каждой ячейки растра с координатами  $i, j$ .

Результатом модельных расчетов является карты нормы ливневого, весеннего и суммарного смыва почвы. По результатам расчета видно, что смыв почвы характеризуется высокой пространственной изменчивостью, в нижней части склонов наблюдаются участки аккумуляции склоновых наносов. На склонах прослеживается чередование полос с относительно высокими и низкими значениями смыва, что в целом согласуется с современными представлениями о развитии эрозионного процесса на склоне. Карта пространственного распределения смыва почвы может стать основанием для выделения участков с разной степенью эрозионной опасности и разработки сценариев наиболее оптимального использования земель.

**Выводы.** Современное представление о развитии эрозионных процессов на склоне и неоднородном пространственном распределении факторов водной эрозии почв нашло отражение в разработанной пространственной модели смыва-аккумуляции почвы. Модель успешно реализована в среде ГИС-пакета *PCRaster* с использованием языка программирования *Visual Basic*. Пространственная ГИС-модель водной эрозии позволяет учесть сложную пространственную дифференциацию природных и хозяйственных факторов склонового эрозионно-аккумулятивного процесса, в связи с чем может быть использована при решении широкого спектра задач, связанных с научным обоснованием рационального использования эрозионно-опасных земель.

**Рецензент: д. геогр. н., проф. Ю. Д. Шуйский**

### Література:

1. Светличный А. А. Эрозиоведение: теоретические и прикладные аспекты / Светличный А. А., Черный С. Г., Швобс Г. И. — Сумы : «Университетская книга», 2004. — 410 с.
2. Светличный А. А. Математическое моделирование водной эрозии: проблема классификации / Светличный А. А. // Вісник ОНУ. Серія географічні та геологічні науки. — [Том 15, вип. 13]. — 2010. — С. 32-39.
3. *PCRaster manual, version 2*: [электронный ресурс]. — Utrecht: Faculty of Geographical Sciences Utrecht University & *PCRaster Environmental Software*, 1998. — 368 p. — Режим доступа: <http://pcraster.geo.uu.nl/documentation/pcrman/book1.html>.
4. Світличний О. О. Принципи просторового моделювання гідрометеорологічних умов зливогого змиву ґрунту / Світличний О. О., Іванова А. В. // Вісник ОНУ. Серія географічні та геологічні науки. — [Том 8, вип. 5]. — 2004. — Том 8. — С. 77-82.
5. Пяткова А. В. Особенности моделирования пространственной изменчивости факторов водной эрозии почв / Пяткова А. В. // Вісник ОНУ. — Серія географічні та геологічні науки. — [Том 13, вип. 6]— 2008. — С. 156-163.
6. П'яткова А. В. Просторове моделювання водної ерозії ґрунту як основа наукового обґрунтування раціонального використання ерозійно-небезпечних земель: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. геогр. наук: спец. 11.00.11. — Конструктивна географія і раціональне використання природних ресурсів / П'яткова А.В. — Одеса, 2011. — 20 с.
7. Svetlitchnyi A. A. Spatial distribution of soil moisture content within catchments and its modeling on the basis of topographic data / A. A. Svetlitchnyi, S. V. Plotnitskiy, O. Y. Stepovaya // *Journal of Hydrology* [V. 277]. — 2003. — P. 50-60.
8. Светличный А. А. Проблема верификации пространственно-распределенных математических моделей водной эрозии почв / А. А. Светличный, А. В. Пяткова, С. В. Плотницкий [и др.] // Вестник Одесского национального университета им. И. И. Мечникова. Географические и геологические науки. — [Том 18, вып. 3]. — 2013. — С. 78-90.