

**ПРОСТРАНСТВЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭРОЗИОННО-АККУМУЛЯТИВНОГО ПРОЦЕССА В ПРЕДЕЛАХ БАЛОЧНОГО ВОДОСБОРА**

*Представлены результаты моделирования поверхностного стока, смыва почвы, транспорта и отложения наносов в пределах водосбора балки Николаевка (юг Одесской области) с использованием Лимбургской модели водной эрозии (LISEM). Рассмотрена проблема оценки коэффициента выноса склоновых наносов. Показано, что коэффициент выноса наносов изменяется не только с изменением площади водосбора, но и в зависимости от обеспеченности смывообразующего ливня.*

**Ключевые слова:** эрозионно-аккумулятивный процесс, геоинформационное моделирование, LISEM, коэффициент выноса наносов, Одесская область.

**Введение.** Водная эрозия почв, являющаяся наиболее распространенным и опасным почвенным деградационным процессом, оказывает многостороннее негативное влияние на ландшафты. В частности, продукты эрозионного разрушения почв, отлагаясь в долинах рек, являются одной из главных причин исчезновения малых рек, обуславливают заиление прудов и водохранилищ, увеличивают мутность речных вод и содержание в них тяжелых металлов, ядохимикатов и других загрязнителей, переносимых наносами в адсорбированном виде. Все это делает весьма актуальной задачу количественной оценки и прогноза смыва почвы и перераспределения наносов по различным звеньям гидрографической сети. Необходимо констатировать, что в настоящее время основное внимание сосредоточено на исследованиях и математическом моделировании смыва (или эрозионных потерь) почвы, обуславливающих снижение почвенного плодородия и деградацию земельных ресурсов. Наиболее известной в мире математической моделью такого типа является Универсальное уравнение потерь почвы (USLE/RUSLE), в Украине – логико-математическая модель эрозионных потерь почвы Г.И.Швебса (1974, 1981), математико-статистическая модель, разработанная в бывшем УкрНИИЗПЭ (1987) и формула И.К.Срибного (1979, 1993). Все они ограничиваются рассмотрением процесса эрозии на склоне, при этом не учитывают перераспределение наносов по склону и не предназначены для оценки выноса наносов в гидрографическую сеть, а тем более – перераспределения их по ее звеньям. При этом существует огромный разрыв между смывом почвы, измеряемым на стоковых площадках или рассчитываемым с использованием математических моделей смыва и стоком наносов, измеряемым в гидрометрических створах, замыкающих речные водосборы.

Оцененное по данным специально проведенных исследований на отдельных небольших водосборах соотношение между выносом наносов через замыкающий створ и смывом почвы на склонах (называемое «коэффициентом доставки наносов» [1], «коэффициентом выноса наносов» [3], а в англоязычной литературе - «sediment delivery ratio», «SDR») изменяется в весьма широких пределах – практически от 1 до 0.

Установлено [1, 3, 4, 7, 8, 12, 13, 15 и др.] уменьшение коэффициента выноса наносов  $K_B$  с ростом площади водосбора в виде степенной зависимости

$$K_B = aF^{-0,2}, \quad (1)$$

где  $F$  – площадь водосбора, км<sup>2</sup>;  $a$  – эмпирический коэффициент, величина которого определяется «ландшафтными условиями водосбора, его распаханностью и обводненностью» [3]. Определены средние региональные значения коэффициента  $a$  для бассейнов Днепра и Волги равные 0,25, для бассейнов Днестра и Дона - 0,75 [3, 4].

Зависимость (1) с определенными значениями параметра  $a$  используется на практике. К сожалению, экспериментальная информационная база для оценки коэффициентов выноса наносов чрезвычайно мала. По-видимому, этим объясняется столь существенное различие (в три раза) в величине коэффициента  $a$  для, например, сходных по своим «ландшафтным условиям» бассейнам Волги и Дона. Представляется также, что вряд ли допустимо сведение зависимости коэффициента выноса наносов от множества определяющих его факторов к виду (1) для значительных по размерам территорий.

Необходимо отметить также, что в целом проблема перераспределения наносов в бассейнах рек, особенно малых, является малоизученной. Нельзя не согласиться с В.Н.Голосовым [2], что одним из наиболее слабо изученных вопросов является количественная оценка переотложения материала в пределах склонов и в днищах долин суходольной сети. Между тем, именно достоверная оценка их буферной роли определяет точность определения вклада бассейновой составляющей в сток речных наносов.

**Материалы и методы исследования.** Одним из наиболее эффективных методов исследования пространственных закономерностей процессов смыва-аккумуляции в пределах речных водосборов в различных природно-хозяйственных условиях, а также оценки и прогноза выноса наносов за их пределы является метод имитационного моделирования на основе адекватной математической модели эрозионно-аккумулятивного процесса. Математическими моделями, способными обеспечить решение рассматриваемых задач, являются физически обоснованные динамические пространственно-распределенные модели эрозионного процесса, к которым относятся модели EUROSEM [9], LISEM [5], эрозионный модуль модели RUNTOX [6] и некоторые другие.

Аналізу результатов имитационного моделирования смыва-аккумуляции в пределах балочного водосбора, расположенного на юге Одесской области и выноса наносов за его пределы с использованием Лимбургской модели водной эрозии (LISEM), верификация которой в природно-хозяйственных условиях Украины выполнена в рамках международного проекта SPARTACUS [14], и посвящена настоящая статья.

Модель LISEM описывает все основные составляющие процесса формирования поверхностного стока (перехват осадков растениями, поверхностное задержание, инфильтрацию), смыв почвы (разрушение почвы каплями дождя, отрыв частиц водным потоком), движение воды, транспорт и аккумуляцию наносов как на склоне, так и в русловой сети. Основу математической модели составляет система дифференциальных уравнений баланса массы (неразрывности) воды и наносов и движения для склонового и руслового стока, применительно к жидкому стоку известная как система уравнений кинематической волны. В модели предоставляется возможность выбора, прежде всего, в зависимости от обеспеченности исходными данными, расчетной модели инфильтрационных потерь стока, в том числе, с использованием постоянного коэффициента фильтрации, на основе уравнения Холтана, одно- и двухслойного уравнения Грина-Эмпта, уравнения влагопереноса. Особенностью модели является то, что ее пространственная (двухмерная) реализация выполнена с использованием возможностей ГИС-пакета PCRaster [10], в связи с чем и подготовка входных пространственно-распределенных данных, и пространственное представление результатов моделирования реализуется с использованием современных возможностей геоинформационных технологий. Входные пространственно-распределенные данные модели задаются в виде растровых электронных карт, подготовленных в формате пакета PCRaster, характеризующих рельеф, почвы, характер землепользования,

растительность на водосборе, а также морфометрию и гидравлические сопротивления русла и поймы. Результатом моделирования являются цифровые карты стока, смыва и аккумуляции, а также табличные данные, характеризующие ход стока, смыва, мутность воды и итоговые их величины в нескольких (до 3-х) предварительно заданных створах.

В качестве тестового водосбора выбран водосбор балки Николаевка площадью 287,4 км<sup>2</sup>, расположенной на юге Причерноморской низменности (в Белгород-Днестровском районе Одесской области), с очень спокойным, в верхней части подовым, рельефом. Средний уклон водосбора равен 0,006 (хотя на отдельных участках достигает 0,03-0,05), диапазон высот - 4,6-81,6 м, максимальное превышение водоразделов над тальвегом – около 21 м. Почвенный покров представлен черноземами южными малогумусными тяжелосуглинистыми, в средней и нижней части водосбора местами слабо- и среднесмытыми, что свидетельствует об активном проявлении здесь эрозионных процессов. Практически весь водосбор распахан и используется для выращивания сельскохозяйственных культур. По днищу балки расположено несколько небольших сел – Полевое, Черкесы, Авидовка, Адамовка и Николаевка, общая площадь которых составляет около 3 % площади ее бассейна.

Набор входных растровых карт, включающий цифровую модель рельефа, карты почв, землепользования, растительности (рис. 1), транспортной инфраструктуры, водно-физических свойств почв и параметров гидравлической шероховатости подстилающей поверхности создан с использованием крупномасштабных топографической и почвенной карт и космического снимка высокого разрешения с сайта Google Earth. Размер ячейки растра 20x20 м, размер растра 955x1857.

Построение гидрологически корректной цифровой модели рельефа выполнено методом обыкновенного точечного Кригинга с использованием пакета Gstat [11].

В процессе исследований реализованы три сценария имитационных

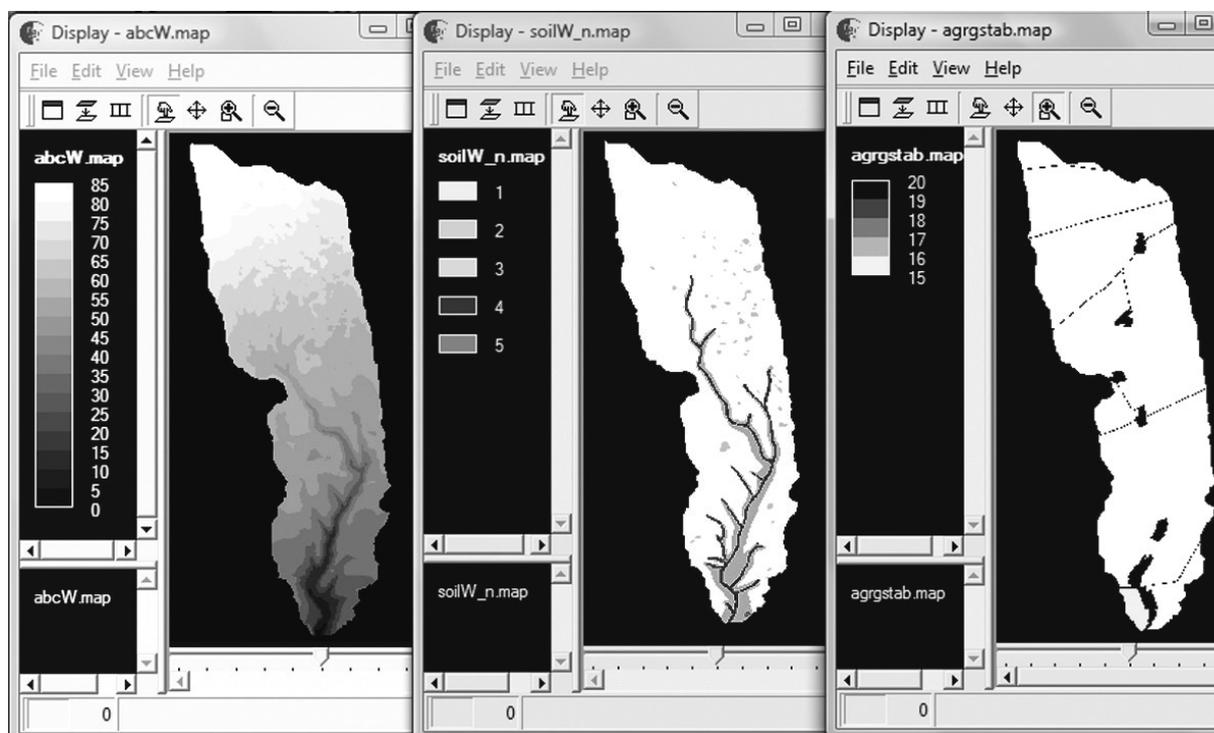


Рис. 1 - Базовые цифровые карты имитационного моделирования: цифровая модель рельефа, карта почв и населенных пунктов и дорожной сети балки Николаевка в окне пакета PCRaster.

экспериментов по моделированию стока, смыва и аккумуляции наносов: 1) при выпадении расчетного ливня повторяемостью 1 раз в 10 лет (10%-ой обеспеченности), 2) при выпадении расчетного ливня повторяемостью 1 раз в 20 лет (5%-ой обеспеченности) и 3) при выпадении расчетного ливня повторяемостью 1 раз в 100 лет (1%-ой обеспеченности). Во всех сценариях моделирование выполнялось для средних для летнего периода условиях предшествующего увлажнения водосбора (начальная объемная влажность верхнего полуметрового слоя почвы равна 0,22) и существующей структуре землепользования и посевных площадей.

Во всех сценариях, кроме построения карт пространственного распределения основных характеристик эрозионного процесса – потерь, стока, смыва, аккумуляции, в автоматическом режиме с заданным временным шагом фиксировался ход расчетного стока воды, смыва почвы, мутности и аккумуляции в двух створах – замыкающем (створ № 2) и расположенном в средней части водосбора (створ № 1), в месте концентрации поверхностного стока в тальвег балки и формирования русла с площадью водосбора 194,7 км<sup>2</sup>.

**Результаты исследований и их анализ.** В процессе реализации первого сценария имитационного моделирования установлено, что выпадение ливня 10%-ой обеспеченности при принятых (средних) условиях предшествующего увлажнения вызывает лишь следы стока и полное отсутствие выноса наносов через замыкающие створы № 1 и № 2, а диспергированный в результате эрозии разбрызгивания твердый материал полностью остается на склонах. Коэффициент выноса наносов в этом случае равен нулю.

Существенно иные результаты получены при реализации второго и третьего сценариев имитационного моделирования (табл. 1). Расчетные средние по площади водосбора модули смыва почвы при выпадении ливня 5%-ой обеспеченности для верхней части балочного водосбора (до створа № 1) составили 0,036 т/га, для всего водосбора (до створа №1) – 0,144 т/га. Расчетные средние модули смыва в результате выпадения ливня 1%-ой обеспеченности составили 14,4 и 13,9 т/га, соответственно.

Таблица 1 - Основные показатели водно-эрозионного процесса по результатам реализации сценариев № 2 и № 3

Створ, водосбора	площадь	Слой смывообразующих осадков, мм	Слой стока, мм	Коэффициент стока	Средние потери почвы, т/га	Коэффициент выноса наносов
Расчетный ливень 5%-ой обеспеченности						
Створ 1, $F=194,7$ км <sup>2</sup>		50,1	4,48	0,089	0,036	0,003
Створ 2, $F=287,4$ км <sup>2</sup>		50,1	4,21	0,084	0,144	0,010
Расчетный ливень 1%-ой обеспеченности						
Створ 1, $F=194,7$ км <sup>2</sup>		103,6	43,2	0,416	14,4	0,252
Створ 2, $F=287,4$ км <sup>2</sup>		103,6	43,1	0,417	13,9	0,223

При этом коэффициент выноса наносов существенно изменялся и от створа к створу, и в зависимости от интенсивности и слоя ливня. Так, для ливня 5%-ой обеспеченности для верхней части водосбора балки, имеющей плоский подовый рельеф, коэффициент выноса наносов составил всего лишь 0,003, а для всего балочного водосбора – 0,01, т.е. величину, более чем в три раза большую. Для ливня 1%-ой обеспеченности при существенно большем коэффициенте стока, для обоих створов равном 0,42, коэффициент выноса наносов для створа № 1 составил 0,252, для створа

№ 2 – 0,223. То есть величина коэффициента выноса при ливне 1%-ой обеспеченности по сравнению с ливнем 5%-ой обеспеченности увеличилась на 1-2 порядка, причем соотношение их для двух створов изменилось на противоположное – в нижнем створе  $K_B$  для 1%-го ливня стал несколько меньшим по величине, чем в верхнем. Таким образом, результаты моделирования показывают, в частности, существенную изменчивость коэффициента выноса и по длине балочного водосбора, и с изменением слоя и интенсивности стока. При этом для ливня 5%-ой обеспеченности имеет место противоречащее модели (1) увеличение коэффициента выноса наносов с ростом площади водосбора.

Анализ карт пространственного распределения характеристик эрозионного процесса, сгенерированных в процессе имитационного моделирования для заданных моментов времени, показывает, насколько малоинформативными являются средние по площади величины смыва почвы. На большей части водосбора балки в связи с очень малыми уклонами ( $<0,005$ ) смыв почвы близок к нулю. В верхней части водосбора балки незначительный смыв отмечается на склонах крупных подов и на отдельных участках верхних звеньев гидрографической сети. При этом в днищах подов отмечается аккумуляция твердого материала, а в тальвегах гидрографической сети участки смыва чередуются с участками аккумуляции наносов. К тому же последние преобладают. Слой аккумулярованного материала уже при ливне 5%-ой обеспеченности в днище балки на отдельных участках достигает 20 см и более. В пределах же нижней части водосбора балки на выпуклых частях склонов расчетный смыв почвы при ливне 5%-ой обеспеченности составляет 40-60 т/га, а при 1%-ом ливне - 120-160 т/га, обуславливая интенсивную деградацию почвенного покрова. Большая часть смываемого с выпуклых участков склонов твердого материала аккумулируется на нижних вогнутых участках склонов и на днище балки и ее притоков (рис. 2).

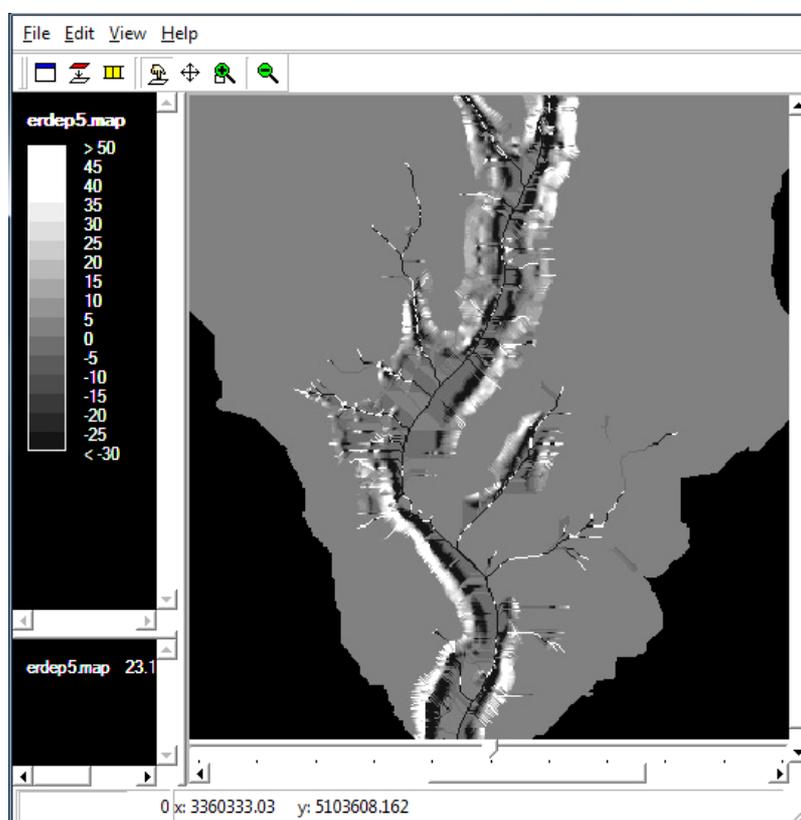


Рис. 2 - Фрагмент (нижняя часть) карты расчетных характеристик смыва почвы (положительные значения) и аккумуляции наносов (отрицательные значения), т/га, в результате выпадения ливня 5%-ой обеспеченности.

Анализ карт пространственного распределения смыва почвы, аккумуляции и выноса твердого материала через замыкающие створы, а также соотношения между составляющими эрозионно-аккумулятивного процесса в пределах различных частей бассейна наглядно показывают весьма сложную пространственную структуру эрозионного процесса, без учета которой невозможно обоснование адекватной системы противоэрозионных мероприятий. С другой стороны, эти материалы могут рассматриваться как демонстрация возможностей технологии географических информационных систем по решению задач, связанных с оценкой и прогнозом характеристик эрозионных потерь почвы.

**Выводы.** 1) В современных условиях имитационное геоинформационное моделирование эрозионного процесса, основывающееся на адекватной физически обоснованной динамической математической модели, является одним из наиболее эффективных методов исследования пространственных закономерностей смыва-аккумуляции наносов в пределах бассейнов малых рек.

2) Даже в пределах малых водосборов вследствие сложного характера пространственного распределения смыва-аккумуляции средние по площади количественные характеристики эрозионно-аккумулятивного процесса являются малоинформативными;

3) Коэффициент выноса наносов, являющийся в настоящее время расчетным интегральным показателем баланса наносов в пределах водосборов различного порядка, изменяется не только в зависимости от «ландшафтных особенностей» водосборов, но и от слоя и интенсивности стока, причем это изменение в пределах отдельных водосборов имеет выраженные индивидуальные особенности.

### Список литературы

1. *Голосов В.Н., Иванова Н.Н., Литвин Л.Ф., Сидорчук А.Ю.* Баланс наносов в речных бассейнах рек Русской равнины // Геоморфология. - 1992. - № 4. - С. 62-71.
2. *Голосов В.Н.* Формирование стока наносов в эрозионно-флювиальных системах: состояние проблемы и перспективы исследований // Маккавеевские чтения – 2003. Москва: Изд-во МГУ, 2004. - С. 41-55.
3. *Сидорчук А.Ю.* Эрозионно-аккумулятивные процессы на Русской равнине и проблемы заиления малых рек // Тр. Академии водохозяйственных наук. Водохозяйственные проблемы русловедения. - 1995.- Вып. 1. - С. 74-83.
4. *Сидорчук А.Ю.* Влияние баланса наносов на состояние малых рек в бассейнах Волги, Дона, Днепра, Днестра // Причины и механизм пересыхания малых рек. - Казань, 1996. - С. 27-36.
5. *De Roo A.P.J., Wesseling C.G., Ritserma C.J.* LISEM: A single event physically-based hydrologic and soil erosion model for drainage basins. I: Theory, input and output // Hydrological Processes. - 1996. - № 10. - P. 1107-1117.
6. *Kivva S.L., Zheleznyak M.I.* Event-based <sup>137</sup>Cs redistribution models: the RUNTOX model. In: SPARTACUS: Spatial redistribution of radionuclides within catchments: development of GIS-based models for decision support systems. EC Contract No. IC15-CT98-0215. Final Report. M. Van der Perk, A.A.Svetlitchnyi, J.W. den Besten and A.Wielinga (eds). Utrecht Centre for Environmental and Landscape Dynamics Faculty of Geographical Sciences, Utrecht University, The Netherlands, 2000. – P.21-35.
7. *Lu H., Moran C., Prosser I., Sivapalan M.* Modelling sediment delivery ratio based on physical principles // Complexity and Integrated Resources Management. Transactions of the 2nd Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software

- Society, edited by C. Pahl-Wostl, S.Schmidt, A.E.Rizzoli, and A.J.Jakeman, 14-17 June 2004, Osnabruck, Germany, 3, 2003. - P. 1117-1122.
8. *Maner S.B.* Factors affecting sediment delivery rates in the Red Hills physiographic area // *Transaction of American Geophysics.* - 1958. - № 39. - P. 669-675.
  9. *Morgan R.P.C, Quinton J.N., Smith R.E., Govers G., Poesen J.W.A., Auerswald K., Chisci G., Torri D., Styczen M.E.* The European soil erosion model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments // *Earth Surface Processes and Landforms.* - 1998. - Vol. 23. - P. 527-544.
  10. *PCRaster manual*, version 2. - Utrecht: Faculty of Geographical Sciences Utrecht University & PCRaster Environmental Software, 1998. - 368 p.
  11. *Pebesma E.J.* Gstat user's manual. – Utrecht, The Netherlands, 2001. – 100 p.
  12. *Richards K.* Sediment delivery and drainage network // *Channel Network Hydrology*, edited by K. Beven and M.J. Kirkby. - 1993. – P. 221-254.
  13. *Roehl J.E.* Sediment source areas, and delivery ratios influencing morphological factors, *International Association of Hydrological Sciences*, 59, 1962. – P. 202-213.
  14. *SPARTACUS: Spatial redistribution of radionuclides within catchments: development of GIS-based models for decision support systems.* EC Contract No. IC15-CT98-0215. Final Report. M. Van der Perk, A.A.Svetlitchnyi, J.W. den Besten and A.Wielinga (eds). - Utrecht Centre for Environmental and Landscape Dynamics Faculty of Geographical Sciences, Utrecht University, The Netherlands, 2000. - 165 p.
  15. *Walling D.E.* The sediment delivery problem // *Journal of Hydrology.* – 1983. - № 65. - P. 209-237.

**Просторове моделювання ерозійно-аккумулятивного процесу в межах балочного водозбору. Светличний О.О., Корзун Т.В., Погребний І.О.**

*Представлені результати моделювання поверхневого стоку, змиву ґрунту, транспорту і відкладення наносів в межах водозбору балки Миколаївка (південь Одеської області) з використанням Лімбургської моделі водної ерозії (LISEM). Розглянута проблема оцінки коефіцієнта винесення наносів. Показано, що коефіцієнт винесення наносів змінюється не тільки із зміною площі водозбору, але і залежно від забезпеченості зливи, що формує стік.*

**Ключові слова:** *ерозійно-аккумулятивний процес, геоінформаційне моделювання, LISEM, коефіцієнт винесення наносів, Одеська область.*

**Spatial modelling of erosion-sedimentation process within the limits of small flat-bottom valley watershed. Svetlitchnyi A.A., Korzun T.V., Pogrebnyi I.O.**

*The results of modelling of surface runoff, washing off of soil, transport and deposition of alluviums within the limits of Nikolaevka small flat-bottom valley watershed (south of the Odessa region) with usage of the Limburg Soil Erosion Model (LISEM) are presented. The problem of the sediment delivery ratio estimation is considered. It is shown, that the sediment delivery ratio changes not only with the change of area of watershed but also depending on probability of thundershower, which formed runoff.*

**Keywords:** *erosion-sedimentation process, geoinformation modelling, LISEM, the sediment delivery ratio, Odessa region.*