

## ФІЗИЧНА ГЕОГРАФІЯ ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

УДК 631.4:63.59

**А. А. Светличный**, доктор геогр. наук, профессор  
кафедра физической географии и природопользования,  
Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова,  
ул. Дворянская, 2, Одесса, 65082, Украина  
ggfr@onu.edu.ua

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДНОЙ ЭРОЗИИ ПОЧВ: РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Дана характеристика основных этапов истории математического моделирования водной эрозии почв. Установлено, что математические модели водной эрозии, разработанные в 50-е – 80-е годы XX столетия не удовлетворяют ни современному уровню эрозиоведения, ни запросам практики. Сформулированы современные требования к математическим моделям эрозии почв как основы научного обоснования рационального использования эрозионноопасных земель и с этих позиций выполнена оценка моделей эрозии, в настоящее время использующихся или рекомендуемых к использованию в Украине. Намечены перспективы совершенствования современных математических моделей водной эрозии почв.

**Ключевые слова:** водная эрозия почв, математические модели, рациональное земледользование.

#### ВВЕДЕНИЕ

Водная эрозия – часть процесса денудации, которая складывается из разрушения, перемещения и отложения частиц почвы и пород под действием дождя и поверхностного стока [19], во многих странах мира получила такое распространение, что ее негативные последствия, прежде всего, на сельскохозяйственных землях в настоящее время представляют собой экономическую и экологическую проблему, реально определяющую национальную безопасность этих стран [1]. К таким странам относится и Украина, в которой на 2000 г. [16] эродированные, т. е. в той или иной степени деградированные, земли составляли треть общей площади сельскохозяйственных земель, имея при этом устойчивую тенденцию к ежегодному увеличению на 80-100 тыс. га.

Решение проблемы водной эрозии почв и, следовательно, устойчивого сбалансированного развития во многих странах мира, в том числе и в Украине, невозможно без ее адекватной математической модели и опирающейся на нее методики расчета и прогноза интенсивности эрозионных потерь (или

смыва) почвы. При бесспорности этого тезиса и достаточно давнем – еще с античных времен – осознании людьми опасности водной эрозии история математического моделирования водной эрозии почв исчисляется всего лишь десятками лет. Разработка первых эрозионных математических моделей – моделей смыва (или потерь) почвы относится ко второй половине – концу 30-х годов XX в. Этими моделями были формулы Я. В. Корнева (1937), Дж. Х. Нила (J. H. Neal) (1938), А. У. Цинга (A. W. Zingg) (1940) и В. А. Казакова (1940). Они представляли собой зависимости расхода склоновых наносов (как в формулах Я. В. Корнева и В. А. Казакова) или средних потерь почвы с единицы площади (как в формулах Дж. Г. Нила и А. У. Цинга) от основных факторов – уклона, длины склона и интенсивности атмосферных осадков (или расходов воды). К настоящему времени общее количество разработанных в разных странах математических моделей водной эрозии измеряется многими десятками и продолжает увеличиваться. Модели относятся к различным типам, имеют разное теоретическое и экспериментальное обоснование, информационное обеспечение и целевое назначение. В связи с этим представляет несомненный *теоретический и прикладной интерес* оценка современного уровня математического моделирования эрозионных потерь (или смыва) почвы с точки зрения возможности их применения для обоснования рационального использования земельных ресурсов в Украине, в первую очередь, ее Степи и Лесостепи, в пределах которых находится так называемый “пояс максимальной эрозии” [8, 19], с учетом современных требований практики к такого рода моделям.

Исходя из этого *целью статьи* является оценка результатов и перспектив математического моделирования и расчета водной эрозии почв как основы научного обоснования рационального использования земельных ресурсов эрозионноопасных территорий, *объектом* – математические модели водной эрозии почв, *предметом* – соответствие этих моделей современным требованиям науки и практики с точки зрения возможности их использования для обоснования рационального использования земельных ресурсов в природно-хозяйственных условиях Степи и Лесостепи Украины.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материалов в рамках данной статьи использованы математические модели водной эрозии почв, разработанные в разных странах мира, но, прежде всего, те из них, которые разработаны, используются или рекомендуются к использованию для почвозащитного проектирования в Украине. Анализ этих моделей выполнен, исходя из авторской классификации существующих моделей водной эрозии [11], согласно которой все математические модели делятся на три группы – эмпирические, концептуальные и теоретические. Модели первой группы делятся на формально-статистические и физико-статистические, модели третьей группы – на формулы смыва и составные динамические модели эрозии-аккумуляции.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ истории математического моделирования водной эрозии почв позволяет выделить в ней несколько качественно различных этапов:

- конец 30-х – конец 50-х годов XX столетия: разработка первых формул расчета смыва почвы, опирающихся на крайне ограниченное информационное обеспечение и весьма схематизированную теоретическую модель формирования процесса; формулы относятся к группе и эмпирических, и теоретических математических моделей, но все они являются моделями с сосредоточенными параметрами (нульмерным, 0D), то есть оперируют средними для склона величинами входных переменных и параметров модели и результатом моделирования является, соответственно, средний для всего склона модуль смыва (потерь) почвы;
- конец 50-х – конец 80-х годов XX столетия: разработка Универсального уравнения эрозионных потерь почвы, его модификаций (USLE/RUSLE) и производных моделей (MUSLE, USLE-M, RUSLE-3D) [28, 29, 26, 23 и др.], а также формально-статистических [5 и др.], концептуальных [3] и физико-статистических [19, 17, 15] эмпирических моделей смыва почвы и теоретических формул смыва на основе более совершенной, чем ранее схематизации процесса [9] в бывшем Советском Союзе; все модели являются нульмерными, но уже делаются попытки создания упрощенных профильных (одномерных, 1D) вариантов некоторых моделей [22, 18, 17];
- конец 80-х годов XX столетия – современный период: разработка составных динамических профильных [25, 4, 27] и пространственно-распределенных (2D) [21, 24 и др.], совершенствование эмпирических физико-статистических моделей, разработка пространственных (2D) вариантов [23, 13, 10], активное использование геоинформационных технологий.

С точки зрения обеспечения рационального использования эрозионно-опасных земель с учетом возможности использования современных адаптивно-ландшафтных почвозащитных систем земледелия – контурно-мелиоративной, ландшафтно-экологической и др. можно сформулировать основные требования к математической модели водной эрозии почв: 1) адекватное описание основных особенностей моделируемого процесса на основе последних достижений эрозиоведения; 2) возможность оценивать не только интенсивность смыва (потерь) почвы, но и аккумуляции наносов на склоне; 3) пространственно-распределенный (2D) характер с возможностью учета изменения факторов процесса не только по длине, но и ширине склона; 4) адаптированность к местным природно-хозяйственным условиям; 5) информационная обеспеченность.

Особенностью математического моделирования является то, что построение математических моделей не регламентируется необходимостью выполнения формальных критериев (как критериев подобия при физическом моделирова-

нии), в связи с чем проблема адекватности модели приобретает особую актуальность. В [2] выделяются два критерия адекватности, т. е. соответствия математической модели оригиналу, которые ведут происхождение от критериев правильности научной теории А. Эйнштейна:

- критерий внутреннего совершенства (требование “естественности”, “логической простоты” основных конструкций модели и соотношений между ними);
- критерий внешней оправданности – соответствие наблюдаемым фактам. Для математической модели это означает, что она верно описывает уже известный фрагмент поведения системы в прошлом.

При этом, если критерий внутреннего совершенства допускает преимущественно качественную оценку соответствия модели оригиналу, то критерий внешнего соответствия требует проверки соответствия результатов моделирования данным наблюдений за моделируемым процессом или явлением. Относительно моделей смыва почвы, позволяющих давать оценку среднесезонной его величины (нормы), это означает проверку модели, как правило, с помощью материалов длительных наблюдений за смывом почвы на стационарных стоково-эрозионных площадках или склоновых водосборах. Учитывая высокую межгодовую изменчивость смыва почвы, для этого необходимы наблюдения длительностью, как минимум, в несколько десятков лет.

В настоящее время в Украине применяются, либо рекомендуются для применения при решении различного рода задач по обоснованию рационального использования эрозионноопасных земель “математико-статистическая модель” смыва почвы, разработанная в бывшем УкрНИИЗПЭ [5], формула И. К. Срибного [15], пространственный вариант Универсального уравнения потерь почвы [23], логико-математическая модель поверхностного смыва почвы Г. И. Швевса [19, 20] и физико-статистическая модель смыва-аккумуляции, разработанная на кафедре физической географии и природопользования ОНУ им. И. И. Мечникова в 1990-е – 2000-е годы [12, 13, 10]. Анализ этих моделей показывает, что только последняя из перечисленных моделей удовлетворяет сформулированным выше требованиям и прошла верификацию с использованием независимых данных.

Модель смыва-аккумуляции ОНУ им. И. И. Мечникова является дальнейшим развитием известной “логико-математической модели” смыва почвы Г. И. Швевса [19, 20] на основе выполненных в последние два десятилетия теоретических и полевых исследований формирования склонового эрозионно-аккумулятивного процесса, а также закономерностей пространственного распределения факторов водной эрозии и их геоинформационного моделирования. В ее современном виде [10, 7] модель смыва-аккумуляции относится к физико-статистическим пространственно-распределенным (2D) моделям и позволяет учесть:

- диалектическое единство склонового эрозионно-аккумулятивного процесса;

- пространственную изменчивость факторов эрозионного процесса, в том числе, рельефного, гидрометеорологического, почвенного и агротехнического;
- ярко выраженную нестационарность ливневого наносообразования;
- особенности изменения интенсивности и характера эрозионного процесса по длине склона;
- пространственную структуру склонового стекания.

Пространственная реализация современной версии модели выполнена с использованием ГИС-пакета PCRaster (Университет г. Утрехта, Нидерланды) и языка программирования Visual Basic [10]. Модель опирается на стандартную информацию, а входящие в нее параметры для Степи и Лесостепи Украины табулированы либо картированы.

Модель прошла верификацию с использованием данных многолетних наблюдений за смывом почвы на стоковых площадках и склоновых водосборов Богуславской полевой экспериментальной гидрологической базы (Киевская область) и Велико-Анадольской водно-балансовой станции (Донецкая область), а также материалов полевых исследований перераспределения склоновых наносов на склонах с использованием радиоцезиевого метода и метода магнитных трассеров (Курская область, РФ) [14].

Говоря о перспективах развития математических моделей водной эрозии, необходимо отметить, во-первых, необходимость разработки либо адаптации к природно-хозяйственным условиям Украины уже существующей составной динамической модели эрозии-аккумуляции как основы решения сложных научно-исследовательских задач по управлению агроландшафтными системами и, во-вторых, актуальность дальнейшего совершенствования физико-статистической модели смыва-аккумуляции. Совершенствование физико-статистической модели в условиях происходящих изменений климата, в первую очередь, должно быть направлено на актуализацию гидрометеорологических факторов ливневого и весеннего смыва, а в условиях перманентной деградации почвенного покрова – на оценку происходящих изменений противоэрозионных свойств почв. Нуждаются в совершенствовании и наши знания о закономерностях пространственной дифференциации факторов эрозии в пределах склона и балочного водосбора, а также методы их геоинформационного моделирования.

## ВЫВОДЫ

Выполненная оценка математических моделей водной эрозии показала, что модели, разработанные в 50-е -80-е годы прошлого столетия не удовлетворяют ни современному уровню эрозиоведения, ни запросам практики. Из математических моделей почвенной эрозии в наибольшей степени соответствует сформулированным требованиям пространственная ГИС-реализованная физико-статистическая математическая модель смыва-аккумуляции, разработанная на кафедре физической географии и природопользования ОНУ

им. И. И. Мечникова. Однако и эта модель нуждается в совершенствовании, которое должно идти по нескольким направлениям, в том числе: актуализации информационной базы, дальнейших исследований закономерностей пространственной дифференциации факторов процесса эрозии и разработки методов их геоинформационного моделирования.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Браун Л. Р. Предотвращение эрозии почвы [Текст] / Л. Р. Браун // Мир восьмидесятых годов. – М. : Прогресс, 1989. – С. 295-317. – Библиогр.: с. 316-317.
2. Горстко А. Б. Введение в моделирование эколого-экономических систем [Текст] / А. Б. Горстко, Г. А. Угольницкий. – Ростов-на-Дону : Изд-во Ростовского ун-та, 1990. – 112 с. – Библиогр.: с. 103-111. – 2000 экз. – ISBN 5-7507-0094-1.
3. Инструкция по определению расчетных гидрологических характеристик при проектировании противоэрозионных мероприятий на Европейской территории СССР (ВСН 04-77) [Текст]. – Л. : Гидрометеоздат, 1979. – 62 с. – Библиогр.: с. 61. – 1000 экз.
4. Кондратьев С. А. Математическое моделирование формирования дождевого стока и водной эрозии на малом сельскохозяйственном водосборе [Текст] / С. А. Кондратьев // Водные ресурсы. – 1989. – № 3. – С. 14-22. – Библиогр.: с. 22.
5. Лавровский А. Б. К вопросу построения модели стока и смыва почвы при ливневой эрозии [Текст] / А. Б. Лавровский, А. Ф. Игуменцев, С. В. Анисимов, Л. Г. Щеголева // Закономерности проявления эрозионных и русловых процессов в различных природных условиях. – М. : Изд-во МГУ, 1987. – С. 89-90. – Библиогр.: нет.
6. Ларионов Г. А. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки [Текст] / Г. А. Ларионов. – М. : Изд-во МГУ, 1993. – 200 с. – Библиогр.: с. 187-198. – 300 экз.
7. Лисецкий Ф. Н. Современные проблемы эрозиоведения: монография [Текст] / Ф. Н. Лисецкий, А. А. Светличный, С. Г. Черный; под ред. А. А. Светличного. – Белгород : Константа, 2012. – 456 с.; 50 с. ил. – Библиогр.: с. 405-449. – 500 экз. – ISBN 978-5-9786-0248-7.
8. Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне [Текст] / Н. И. Маккавеев. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 346 с. 38 с. ил. – Библиогр.: с. 321-343. – 300 экз.
9. Мирцхулава Ц. Е. Инженерные методы расчета и прогноза водной эрозии [Текст] / Ц. Е. Мирцхулава. – М. : Колос, 1970. – 239 с. 25 с. ил. – Библиогр.: с. 232-236. – 350 экз.
10. П'яткова А. В. Просторове моделювання водної ерозії ґрунту як основа наукового обґрунтування раціонального використання ерозійно-небезпечних земель [Текст] : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 11.00.11 / А. В. П'яткова; Одеський державний екологічний університет. – Одеса, 2011. – 20 с.; 3 с. ил. – Библиогр.: с. 18.
11. Светличный А. А. Математическое моделирование водной эрозии: проблема классификации [Текст] / А. А. Светличный // Вісник Одеського національного університету. Географічні та геологічні науки. – 2010. – Том 15. – Вип. 5. – С. 32-39. – Библиогр.: с. 37-39.
12. Светличный А. А. Принципы совершенствования эмпирических моделей смыва почвы [Текст] / А. А. Светличный // Почвоведение. – 1999. – № 8. – С. 1015-1023. – Библиогр.: с. 1022-1023.
13. Светличный А. А. Эрозиоведение: теоретические и прикладные аспекты : монография [Текст] / А. А. Светличный, С. Г. Черный, Г. И. Швевс. – Сумы: ИТД “Университетская книга”, 2004. – 410 с. – Библиогр.: с. 376-410. 56 с. ил. – 500 экз. – ISBN 966-680-170-1.
14. Светличный А. А. Проблема верификации пространственно-распределенных математических моделей водной эрозии почв [Текст] / А. А. Светличный, А. В. Пяткова, С. В. Плотницкий, В. Н. Голосов, А. П. Жидкин // Вісник Одеського національного університету. Географічні та геологічні науки. – 2013. – Том 18. – Вип. 3. – С. 38-48. – Библиогр.: с. 47-48.
15. Срибный И. К. Среднегодовой сток воды и смыв почвы со склонов [Текст] / И. К. Срибный // Водохозяйственное строительство на малых реках. – Киев : Будівельник, 1977. – С. 145-147. – Библиогр.: нет.
16. Структура, динаміка та розподіл земельного фонду України (за станом на 1 січня 2000 року) [Текст]. – Київ, 2000. – 125 с. – Библиогр.: с. 124. – 100 экз.
17. Сурмач Г. П. Опыт расчета смыва почв для построения комплекса противоэрозионных мероприятий [Текст] / Г. П. Сурмач // Почвоведение. – 1979. – № 4. С. 92-103. – Библиогр.: с. 102-103.
18. Читишвили Г. Ш. Расчет интенсивности плоскостной эрозии с учетом влияния крутизны склона [Текст] / Г. Ш. Читишвили // Сборник научных трудов ВНИИГиМ. – 1974. – Вып. 3. – С. 171-179. – Библиогр.: с. 179.

19. Швєбс Г. И. Формирование водной эрозии, стока наносов и их оценка [Текст] / Г. И. Швєбс. – Л. : Гидрометеоздат, 1974. – 184 с. – Библиогр.: с. 177-183. – 18 с. ил. – 1700 экз.
20. Швєбс Г. И. Теоретические основы эрозиоведения [Текст] / Г. И. Швєбс. – Киев-Одесса : Вища школа, 1981. – 223 с. – Библиогр.: с. 219-222. – 21 с. ил. – 500 экз.
21. De Roo A. P. J. LISEM: A physically-based hydrological and soil erosion model incorporated in a GIS [Текст] / A. P. J. De Roo, C. G. Wesseling, N. H. D. T. Cremers, R. J. E. Offermans, C. J. Ritserma, K. Van Oostindie; J. J. Harts, H. F. L. Ottens, H. J. Scholten (eds) // EGIS / MARY'94 Conference Proceedings. – Utrecht/Amsterdam : EGIS Foundation, 1994. – P. 207-216. – Библиогр.: с. 215-216.
22. Foster G. R. Evaluating irregular slopes for soil loss prediction [Текст] / G. R. Foster, W. H. Wischmeier // Trans. Am. Soc. Agric. Engrs. – 1974. – Vol. 17. – P. 305-309. – Библиогр.: с. 309.
23. Mitas L. Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention [Текст] / L. Mitas, H. Mitasova // Water Resources Research. – 1998. – № 3. – P. 505-516. – Библиогр.: с. 515-516.
24. Morgan R. P. The European soil erosion model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments [Текст] / R. P. C. Morgan, J. N. Quinton, R. E. Smith, G. Govers, J. W. A. Poesen, K. Auerswald, G. Chisci, D. Torri, M. E. Styczen // Earth Surface Processes and Landforms. – 1998. – Vol. 23. – P. 527-544. – Библиогр.: с. 543-544.
25. Nearing M. A. A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project Technology [Текст] / M. A. Nearing, G. R. Foster, L. J. Lane, S. C. Finkner // Transactions of the ASAE. – 1989. – Vol. 32(5). – P. 1587-1593. – Библиогр.: с. 1593.
26. Renard K. G. ruSLE: Revised universal soil loss equation [Текст] / K. G. Renard, G. R. Foster, G. A. Weesies, J. P. Porter // J. Soil and Cons. – 1991. – Vol. 46. – P. 30-33. – Библиогр.: с. 33.
27. Svetlitchnyi A. A. Mathematical modelling of erosion-accumulative process on a slope [Текст] / A. A. Svetlitchnyi; V. V. Medvedev (ed) // Collection of articles by Ukrainian members of European Society For Soil Conservation, 1993. – P. 46-52. – Библиогр.: с. 51-52.
28. Wischmeier W. H. Evaluation of factors in the soil-loss equation [Текст] / W. H. Wischmeier, D. D. Smith, R. E. Uhland // Agricultural Engineering. – 1958. – Vol. 39. – P. 458-462. – Библиогр.: с. 462.
29. Wischmeier W. H. Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning [Текст] / W. H. Wischmeier, D. D. Smith // Agriculture Handbook No. 537. – Washington, D. C. : United States Department of Agriculture. – 1978. – 65 p. – Библиогр.: с. 63-64. – 600 экз.

## REFERENCES

1. Braun, L. R. (1989), "Prevention of soil erosion" ["Predotvrashchenie erozii pochvy"] // *Myr vos'mydesyatykh hodov*, Moscow: Progress, pp. 295-317.
2. Gorstko, A. B., Ugolnitskiy, G. A. (1990), Introduction to the modeling of eco-economical systems" [Vvedenie v modelirovanie ekologo-ekonomicheskikh sistem]. – Rostov-na-Donu : Publishing house of Rostov university, 112 p.
3. Instructions for determining the design hydrological characteristics in the design of erosion control measures in the European part of the USSR (VSN 04-77) [Instruktsiya po opredeleniyu raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik pri proektirovani protivoerozionnykh meropriyatiy na Yevropeyskoy territorii SSSR (VSN 04-77)], (1979), Leningrad : Hydrometeoyzdat, 62 p.
4. Kondratiev, S. A. (1989), "Mathematical modeling of formation of rainfall runoff and aqueous erosion in a small agricultural catchment" ["Matematicheskoe modelirovanie formirovaniya dozhdevogo stoka i vodnoy erozii na malom selskokhozyaystvennom vodosbore"], *Vodnye resursy*, № 3, pp. 14-22.
5. Lavrovskiy, A. B., Igumentsev, A. F., Anisimov, S. V., Schegoleva, L. G. (1987), "Constructing models runoff and soil loss during storm erosion" ["K voprosu postroeniya modeli stoka i smyva pochvy pri livnevoy erozii"], *Zakonornosti proyavleniya erozionnykh i ruslovykh protsessov v razlichnykh prirodnykh usloviyakh*, Moscow: Publishing house of MSU, pp. 89-90.
6. Larionov, G. A. (1993), "Soil erosion and deflation: the basic laws and quantitative evaluation" ["Eroziya i deflyatsiya pochv: osnovnye zakonornosti i kolichestvennye otsenki"], Moscow : Publishing house of MSU, 1993. – 200 p.
7. Lisetsky, F. N., Svetlitchnyi, A. A., Chorny, S. G. (2012), Modern problems of soil erosion science: monograph [Sovremennyye problemy eroziovedeniya: monografiya], A. A. Svetlitchnyi (ed), Belgorod : Konstanta, 456 p.
8. Makkaveev, N. I. (1955), *Riverbed and erosion in the basin [Ruslo reki i eroziya v ee bassejne]*, Moscow: Publishing house of Academy of Science of USSR, 346 p.
9. Mirtskhulava, C. E. (1970), *Engineering methods for calculating and predicting water erosion [Inzhenernyye metody rascheta i prognoza vodnoy erozii]*, Moscow : Kolos, 239 p.

10. Pyatkova, A. V. (2011), *Spatial modeling of soil erosion as a basis for the scientific substantiation of the rational use of erosion-prone land: Author's thesis [Prostorove modelyuvannya vodnoyi eroziyi gruntu yak osnova naukovooho obgruntuvannya ratsional'noho vykorystannya eroziyno-nebezpechnykh zemel]* : avtoref. dis.... kand. geogr. nauk, Odesa, 20 p.
11. Svetlitchnyi, A. A. (2010), "Mathematical modeling of water erosion: the problem of classification" ["Matematicheskoe modelirovanie vodnoy erozii: problema klassifikatsii"], *Bulletin of the Odessa National University. Geographical and geological sciences*, Vol. 15, No 5, pp. 32-39.
12. Svetlytchnyi, A. A. (1999), "Principles of improving empirical models of soil loss". ["Printsipy sovershenstvovaniya empiricheskikh modeley smyva pochvy"], *Pochvovedenye*, № 8, pp. 1015 – 1023.
13. Svetlitchnyi, A. A., Chorny, S. H., Shvebs, H. I. (2004), *Soil erosion science: theoretical and applied aspects: monograph [Eroziovedenie: teoreticheskie i prikladnye aspekty: monografiya]*, Sumy: ITD "Universitetskaya kniga", 410 p.
14. Svetlitchnyi, A. A., Pyatkova, A. V., Plotnytsky, S. V., Holosov, V. N., Zhydkyn, A. P. (2013), "Problem verification spatially distributed mathematical models of water erosion" ["Problema verifikatsii prostranstvenno-raspredeleennykh matematicheskikh modeley vodnoy erozii pochv"], *Bulletin of the Odessa National University. Geographical and geological sciences*, Vol. 18, No 3, pp. 78-90.
15. Srybny, Y. K. (1977), "The average annual runoff and soil erosion from the slopes" [Srednehodovoy stok vody y smyv pochvy so sklonov], *Vodokhozyaystvennoe stroitel'stvo na malykh rekakh*, Kyev : Budivel'nyk, pp. 145-147.
16. *Structure, dynamics and distribution of land resources of Ukraine (as of 1 January 2000) [Struktura, dynamika ta rozpodil zemel'noho fondu Ukrayiny (za stanom na 1 sichnya 2000 roku)]*, Kyiv, 2000, 125 p.
17. Surmach, G. P. (1979), "Experience in calculating soil erosion for construction of the complex anti-erosion measures" ["Opyt rascheta smyva pochv dlya postroeniya kompleksa protivoeroziionnykh meropriyatiy"], *Pochvovedenye*, № 4, pp. 92–103.
18. Chitishvili, G. Sh. (1974), "Calculation sheet erosion intensity with the influence of slope steepness" [Raschet intensivnosti ploskostnoy erozii s uchetoм vliyaniya krutizny sklona], *Collection of scientific works of VNI-GiM*, Vol. 3, pp. 171-179.
19. Shvebs, H. I. (1974), *Formation water erosion, sediment runoff and their evaluation [Formirovanie vodnoy erozii, stoka nanosov i ikh otsenka]*, Leningrad : Hydrometeoizdat, 184 p.
20. Shvebs, H. I. (1981), *Theoretical bases of soil erosion science [Teoreticheskie osnovy eroziovedeniya]*, Kyev-Odessa : Vyscha shkola, 223 p.
21. De Roo, A. P. J., Wesseling, C. G., Cremers, N. H. D. T., Offermans, R. J. E., Ritserma, C. J., Van Oostindie, K. (1994), "LISEM: A physically-based hydrological and soil erosion model incorporated in a GIS" // J. J. Harts, H. F. L. Ottens, H. J. Scholten (eds), *EGIS / MARY'94 Conference Proceedings*. – Utrecht/Amsterdam: EGIS Foundation, pp. 207-216.
22. Foster, G. R., Wischmeier, W. H. (1974), "Evaluating irregular slopes for soil loss prediction" // *Trans. Am. Soc. Agric. Engrs*, Vol. 17, pp. 305-309.
23. Mitas L., Mitasova H. (1998), "Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention" // *Water Resources Research*, № 3, pp. 505-516.
24. 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. (1998), "The European soil erosion model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments" // *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 23, pp. 527-544.
25. Nearing, M. A., Foster, G. R., Lane, L. J., Finkner, S. C. (1989), "A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project Technology" // *Transactions of the ASAE*, Vol. 32(5), pp.1587-1593.
26. Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., Porter, J. P. (1991), "RUSLE: Revised universal soil loss equation" // *J. Soil and Cons*, Vol. 46, pp. 30-33.
27. Svetlitchnyi, A. A. (1993), "Mathematical modelling of erosion-accumulative process on a slope" // V. V. Medvedev (ed), *Collection of articles by Ukrainian members of European Society For Soil Conservation*, pp. 46-52.
28. Wischmeier, W. H., Smith, D. D., Uhland, R. E. (1958), "Evaluation of factors in the soil-loss equation" // *Agricultural Engineering*, Vol. 39, pp. 458-462.
29. Wischmeier, W. H., Smith, D. D. (1978), *Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning / Agriculture Handbook No.537*, Washington, D. C. : United States Department of Agriculture, 65 p.

Поступила 25. 07. 2014

**О. О. Світличний**, доктор геогр. наук, професор  
кафедра фізичної географії і природокористування,  
Одеський національний університет ім. І. І. Мечникова,  
2, Дворянська вул., 2, Одеса, 65082, Україна  
ggfr@onu.edu.ua

## **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВОДНОЇ ЕРОЗІЇ ҐРУНТІВ: РЕЗУЛЬТАТИ І ПЕРСПЕКТИВИ**

### **Резюме**

Дана характеристика основних етапів історії математичного моделювання водної ерозії ґрунтів. Встановлено, що математичні моделі водної ерозії, розроблені в 50-ті – 80-ті роки ХХ століття не задовольняють ні сучасному рівню ерозієзнавства, ні запитам практики. Сформульовано сучасні вимоги до математичних моделей ерозії ґрунтів як основи наукового обґрунтування раціонального використання ерозійнонебезпечних земель і з цих позицій виконана оцінка моделей ерозії, що в даний час використовуються або рекомендовані до використання в Україні. Намічені перспективи вдосконалення сучасних математичних моделей водної ерозії ґрунтів.

**Ключові слова:** водна ерозія ґрунтів, математичні моделі, раціональне землекористування.

**A. A. Svetlitchnyi**, doctor of geographical sciences, professor  
Department of Physical Geography  
Odessa I. I. Mechnikov National University,  
2, Dvorianskaya St., Odessa-82, 65082, Ukraine  
ggfr@onu.edu.ua

## **MATHEMATICAL MODELING OF SOIL EROSION: RESULTS AND PROSPECTS**

### **Abstract**

The aim of the article is to assess the results and perspectives of mathematical modeling and calculation of soil erosion as the basis of scientific justification of sustainable land use within the erosion dangerous areas, the object – the mathematical models of soil erosion and the subject – evaluation conformity of these models to the requirements of modern science and practice from terms of being able to use them to justify the rational use of land resources in the natural and economic conditions of the Steppe and Forest-Steppe zones of Ukraine.

Presented the periodization of history of mathematical modeling of soil erosion in the world since the late 30-ies of XX century, for each period the characteristics of the main singularities is given. Formulated the requirements to the mathematical models of soil erosion from the standpoint of solving problems on the justification of rational use of erosion dangerous areas based on modern systems of adaptive-landscape and precision farming systems.

It is shown that from mathematical models of soil erosion, currently used in Ukraine, to the greatest extent to these requirements corresponds the spatial (2D) GIS implemented physicaly-statistical mathematical model of erosion-accumulation, developed at Odessa National I. I. Mechnikov university. The model successfully passed verification by independent data observations and measurements. However, it needs to be improving, that should go in several directions, including updating the information base, further research patterns of spatial distribution of factors of the erosion-accumulation process and the development of methods of their geo-information modelling.

**Keywords:** soil erosion, mathematical models, rational land use.