

6. Раков, Е. А. К вопросу формирования флоры на нарушенных промышленностью землях / Е. А. Раков, Т. С. Чибрик // Экология. — 2009. — № 6. — С. 473-476.
7. Тохтарь, В. К. Временная динамика флор техногенных территорий юго-востока Украины / В. К. Тохтарь, А. И. Хархота // Промышленная ботаника. Донецкий бот. сад НАН Украины. — 2004. — Вып. 4. — С. 86—100.
8. Тохтарь, В. К. Сравнение локальных флор техногенных территорий Европы / В. К. Тохтарь, А. И. Хархота, Р. Ростаньски и др // Промышленная ботаника. Донецкий бот. сад НАН Украины, 2003. — Вып. 3. — С. 7—13.
9. Чибрик, Т. С. Восстановление фиторазнообразия на нарушенных техногенных объектах таежной зоны Урала / Т. С. Чибрик // Биологическая рекультивация и мониторинг нарушенных земель: Мат-лы Междун. науч. конф. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2007. — С. 743—762.
10. Ярошук, Ю. В. Структурная организация растительности техногенно изменённых ландшафтов южного Криворожского бассейна / Ю. В. Ярошук, Н. Г. Сметана, А. Н. Сметана // Биологическая рекультивация и мониторинг нарушенных земель: Мат-лы Междун. науч. конф. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2007. — С. 812—826.
11. Rostanski A., Wozniak G. The development of vegetation on industrial wastelands in Upper Silesia (Poland) and the Ruhr Region (Germany) // Mechanisms of Anthropogenic changes of the plant cover: publications of the Department of Plant Taxonomy of the Adam Mickevich University. Poznan. — 2000. — № 10. — P. 259—269.

ДК 911.5+004.9

**А. А. Светличный**

Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова



## ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗ ВОДНОЙ ЭРОЗИИ ПОЧВ

На основе рассмотрения проблем и опыта пространственного геоинформационного моделирования эрозионных потерь почвы в мире и Украине обоснованы наиболее перспективные подходы к разработке пространственно-распределенных моделей водной эрозии почв.

**Ключевые слова:** водная эрозия почв, математическое моделирование, сценарии ГИС-реализации.

**Svetlitchnyi A.A.**

**SPATIAL GEOINFORMATIONAL MODELING AND FORECAST OF SOIL WATER EROSION**

Based on consideration of the problems and experience of spatial geoinformation modeling of soil erosion losses in the world and in Ukraine justified the most promising approaches to the development of spatially distributed of soil erosion models.

**Keywords:** soil erosion, mathematical modeling, scenarios of GIS implementation.

**О. О. Світличний.**

**ПРОСТОРОВЕ ГЕОІНФОРМАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ПРОГНОЗ ВОДНОЇ ЕРОЗІЇ ҐРУНТІВ**

На основі розгляду проблем та досвіду просторового геоінформаційного моделювання ерозійних втрат ґрунту в світі та Україні обґрунтовані найбільш перспективні підходи до розробки просторово-розподілених моделей водної ерозії ґрунтів.

**Ключові слова:** водна ерозія ґрунтів, математичне моделювання, сценарії ГІС-реалізації.

**Вступление.** Водная эрозия почв является наиболее распространенным почвенным деградационным процессом, наносящим огромный экономический и экологический ущерб во многих странах мира, в том числе и в Украине. В связи с этим, разработка адекватной математической модели эрозионных потерь почвы, позволяющей обеспечить научное обоснование почво-водоохранного обустройства агроландшафтов, является актуальной научной и прикладной задачей. Поскольку все природные и антропогенные факторы склонового эрозионно-аккумулятивного процесса имеют выраженный пространственно-распределенный характер, наиболее адекватным инструментарием для решения этой задачи является технология географических информационных систем. Именно

появление, развитие и распространение геоинформационных технологий сделало практически осуществимой задачу пространственного моделирования, расчета и прогноза водной эрозии. Несмотря на очевидный пространственно распределенный характер этой задачи, длительное время практика противоэрозионного проектирования в Украине, как и в других странах, основывалась на моделях с сосредоточенными параметрами (0-мерных). К этой группе моделей относятся известные в Украине: Универсальное уравнение эрозионных потерь почв (USLE) [18], логико-математическая модель эрозионных потерь почв Г. И. Швевса [9], формула смыва И. К. Срибного [7], математико-статистическая модель бывшего УкрНИИЗПЭ [1]. Приближенное решение профильной (1-мерной) модели эрозии

почв предложено в формуле (логико-математической модели) смыва почвы Г. П. Сурмача [8] и в модификациях Универсального уравнения, предложенных Г. Р. Фостером и У. Х. Уишмейером [12] и Г. А. Ларионовым [2].

**Исходные предпосылки.** Первые опыты по ГИС-реализации математических моделей смыва почвы относятся к началу 80-х годов прошлого столетия. В 1983 г. в США с помощью пакета ГИС и обработки изображений VICAR/IBIS была осуществлена ГИС-реализация профильной версии Универсального уравнения и дан прогноз эрозионных потерь почвы для тестового участка, расположенного в штате Калифорния [16]. В настоящее время известно множество пространственных реализаций Универсального уравнения потерь почвы и его последующих версий, в том числе [15, 14], выполненных с использованием ГИС-пакетов IDRISI, ArcView GIS, ArcGIS Desktop, GRASS и др. в различных странах мира, в том числе и в Украине [3].

С середины 90-х годов геоинформационные технологии стали использоваться для пространственной реализации алгоритмически значительно более сложных моделей водной эрозии, в том числе динамических. Примерами могут служить Лимбургская модель водной эрозии почвы (LISEM), разработанная в Университете г. Утрехта (Нидерланды) [11], модель склонового эрозионного процесса, разработанная на основе численного интегрирования системы уравнений диффузионной волны в среде ГИС-пакета GRASS [13] и др. Однако, несмотря на успехи в построении детальных динамических (физико-математических, теоретических) моделей эрозионно-аккумулятивного процесса, в связи с их повышенной требовательностью к составу и качеству информационного обеспечения, модели данной группы пока не находят применения в практике противозерозионного проектирования.

Анализ имеющегося опыта ГИС-реализации моделей первой группы (эмпирических и концептуальных [6]) показывает необходимость их дальнейшего совершенствования, причем, как в технологиях пространственного геоинформационного моделирования, так и в описании моделируемого процесса или явления.

**Цель исследования.** На основе обзора проблем и опыта пространственного геоинформационного моделирования эрозионных потерь почвы в мире и Украине, провести обоснование наиболее перспективных подходов к разработке пространственно-распределенных моделей водной эрозии почв.

**Изложение основного материала.** Основное требование к содержательной части математической модели водной эрозии заключается в том, чтобы она адекватно и с учетом пространственной изменчивости ее факторов описывала моделируемый процесс, а к ГИС-пакету, который используется для моделирования, — обеспечивать построение гидрологически корректной цифровой модели рельефа, карт укло-

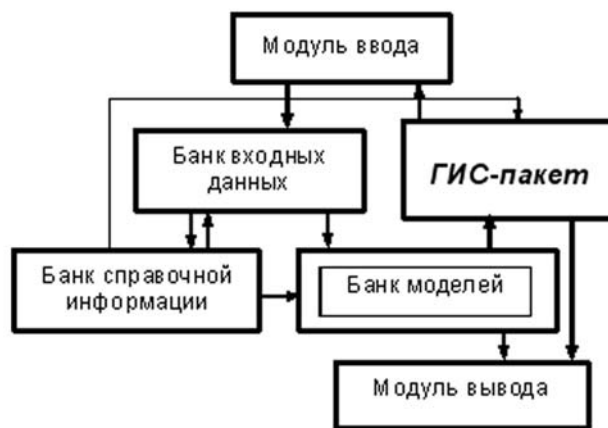


Рис. 1. Схема взаимодействия ГИС и моделей процессов – вариант 1

нов, экспозиций, линий тока и прочих производных от цифровых моделей рельефа, а также реализацию достаточно сложных вычислительных алгоритмов.

Своеобразие проблемы геоинформационного моделирования эрозионных и других процессов в природных и природно-хозяйственных территориальных системах заключается в том, что геоинформационные технологии в мире получили распространение только в конце 80-х – 90-е годы прошлого столетия, когда базовые версии основных математических моделей эрозионных потерь почв уже были разработаны, апробированы и активно использовались. Поэтому здесь встает проблема интеграции уже существующих математических моделей и инструментальных ГИС – коммерческих ГИС-пакетов, а также в целом проблема взаимодействия между моделью и инструментальной ГИС. К настоящему времени сформировалось несколько подходов к взаимодействию ГИС и моделей процессов в природных или природно-хозяйственных территориальных системах. Их можно свести к двум основным и одному промежуточному вариантам.

Первый вариант схемы взаимодействия ГИС-пакета и модели процесса (рис. 1) заключается в привлечении коммерческих ГИС-пакетов и соответствующих аппаратных средств (компьютеров, дигитайзеров, сканеров, плоттеров и пр.) для подготовки входных и отображения выходных пространственно-распределенных данных в виде цифровых

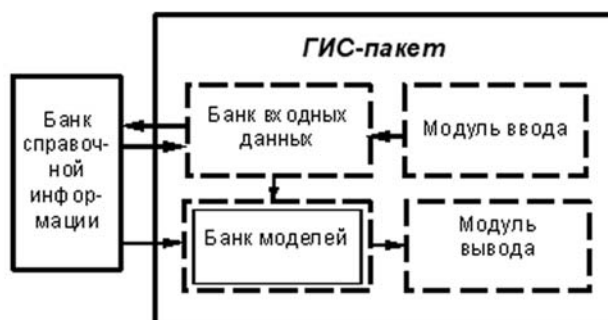


Рис. 2. Схема взаимодействия ГИС и моделей процессов – вариант 2

карт, с возможностью представления результатов моделирования в цветном и черно-белом полутоновом изображении в двух- и трехмерном виде, с использованием анимации и средств мультимедиа. В этом случае ГИС-пакет, по сути, служит дополнением к уже существующей системе моделирования, реализованной традиционными средствами. Этот вариант обычно реализуется применительно к уже хорошо зарекомендовавшим себя мощным компьютерным системам моделирования.

Примеры такого подхода демонстрируют системы динамического моделирования, разработанные в Исследовательской лаборатории моделирования окружающей среды (Environmental Modeling Research Laboratory), США, в частности, Система моделирования поверхностного стока (Surface Water Modeling System, SMS) или Система моделирования грунтовых вод (Watershed Modeling System, WMS), системы MIKE 11 GIS, MIKE BASIN и другие продукты датского консорциума DHI Water and Environment, в которых для подготовки входных данных и представления результатов моделирования в большинстве случаев используются ГИС-пакеты компании ESRI.

Второй вариант схемы взаимодействия ГИС-пакетов и моделей природных процессов, в том числе и водной эрозии, заключается в максимально полном использовании возможностей ГИС-пакета, включая кроме подготовки входных данных и вывода результатов моделирования, полную реализацию модели аналитическими, языковыми и программными средствами ГИС-пакета (рис. 2). В этом случае за рамками ГИС-пакета остается только атрибутивная база данных справочной информации с собственной системой управления базой данных (СУБД), для взаимодействия с которой в современных мощных ГИС-пакетах имеются соответствующие программные модули. В практику моделирования данный подход был, по-видимому, введен Ван Деурсеном и Дж. Квадийком при разработке балансовой модели стока р. Рейн [17]. Этот подход к интеграции ГИС и моделей водной эрозии предъявляет повышенные требования к аналитическим возможностям ГИС-пакета, включая как обязательное условие возможность построения карты линий тока и водосборных бассейнов, не говоря уже о необходимости выполнения достаточно сложных арифметических и логических операций с растеризованной информацией. Такими возможностями в настоящее время обладают многие достаточно мощные ГИС-пакеты, в том числе такие широко известные в мире, как ARC/INFO, ArcGIS Desktop, MGE Intergraph, GRASS, IDRISI, PCRaster.

Одним из примеров реализации этого подхода является Лимбургская модель водной эрозии почв (LISEM), разработанная в середине 90-х годов в университете г. Утрехта, Нидерланды [11] и представляющая собой пространственно-распределенную динамическую модель водной эрозии, в основе ко-

торой лежат системы уравнений кинематической волны для склонового и руслового стока, дополненные дифференциальными уравнениями баланса склоновых и русловых наносов, а также системой математических моделей частных процессов — перехвата осадков растительностью, поверхностного задержания, инфильтрации, межручейковой эрозии, ручейковой эрозии, транспорта и отложения наносов. Пространственная реализация модели, а также обеспечение ее функционирования осуществлено с использованием языковых, программных и функциональных возможностей пакета моделирования окружающей среды PCRaster, разработанной на географическом факультете Университета г. Утрехта, Нидерланды.

Возможен также промежуточный (3-ий) вариант взаимодействия ГИС и моделей процессов — использование отдельных геоинформационных процедур как элементов программного комплекса моделирования, ускоряющих или упрощающих реализацию вычислительного алгоритма модели. В качестве примера таких процедур можно назвать процедуры построения карт уклонов, экспозиций, местных линий тока, склоновых и русловых водосборов, которые представлены в составе практически всех ГИС-пакетов с развитыми аналитическими возможностями.

Второй и третий варианты схемы взаимодействия инструментальной ГИС и модели эрозионных потерь почв реализован в Одесском национальном университете имени И. И. Мечникова. В качестве модели процесса использована физико-статистическая модель смыва-аккумуляции [5], разработанная на основе модификации логико-математической модели эрозионных потерь почвы Г. И. Швевса [9, 10]. Модель учитывает все основные природные и хозяйственные факторы эрозионного процесса, включая нестационарность ливневого наносообразования, характер продольного профиля склонов и пространственную структуру склонового стекания [5, 6, 4 и др.]. Модель верифицирована по материалам наблюдений на стоковых площадках и склоновых водосборах Богуславской научно-исследовательской полевой гидрологической базы УкрНИГМИ и Велико-Анадольской водно-балансовой станции. В качестве базового ГИС-пакета использован пакет PCRaster.

Опыт пространственного геоинформационного моделирования склоновой эрозии показал возможность учета сложной структуры эрозии-аккумуляции на склонах, определяемой характером топографической поверхности, структурой почвенного покрова, особенностями ливневой деятельности и агротехники. Необходимым условием применения таких моделей для целей противоэрозионного проектирования, в том числе на основе адаптивно-ландшафтных систем земледелия, является наличие детальной гидрологически корректной цифровой модели рельефа и подробной почвенной карты.

**Выводы.**

1. Современные геоинформационные технологии в настоящее время представляют собой наиболее совершенный инструментарий для разработки пространственно-распределенных математических моделей эрозионных потерь почвы.

2. В зависимости от цели моделирования взаимодействие между моделью процесса или явления и инструментальной ГИС может происходить по одному из трех сценариев (вариантов). Наиболее перспективной является реализация второго и третьего сценариев, опирающихся, с одной стороны, на языковые и программные возможности та-

ких программных пакетов, как PCRaster и GRASS, а с другой, — на языки программирования высокого уровня.

3. Реализованные на этих принципах адекватные, прошедшие верификацию на независимых данных, пространственные (2D) модели эрозионных потерь почвы способны решать различные задачи, в том числе и по обоснованию ландшафтно-адаптивных систем земледелия.

**Рецензент – доктор географических наук,  
профессор Ю. Д. Шуйский**

**Литература:**

1. Лавровский И. Г. К вопросу построения модели стока и смыва почвы при ливневой эрозии / И. Г. 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.
2. Ларионов Г. А. Эрозия и дефляция почв / Г. А. Ларионов — М.: Изд-во МГУ, 1993. — 200 с.
3. Мкртчян О. Геоінформаційне моделювання процесу схилової ерозії / О. Мкртчян // Вісн. Львівс. ун-ту. Серія геогр. — 2004. — Вип. 30. — Частина 1. — С. 188–193.
4. Пяткова А. В. Особенности моделирования водной эрозии почв с учетом пространственной изменчивости ее факторов / А. В. Пяткова // Метеорологія, кліматологія та гідрологія: Міжвід. наук. збірник України. — Одеса: Вид. «Екологія», 2008. — Вип. 50. — Частина 2. — С. 437–442.
5. Светличный А. А. Принципы совершенствования эмпирических моделей смыва почвы / А. А. Светличный // Почвоведение. — 1999. — № 8. — С. 1015–1023.
6. Светличный А. А. Эрозиоведение: теоретические и прикладные аспекты / А. А. Светличный, С. Г. Черный, Г. И. Швец — Сумы: ИТД «Университетская книга», 2004. — 410 с.
7. Срибный И. К. Среднегодовой сток воды и смыв почвы со склонов / И. К. Срибный // Водохозяйственное строительство на малых реках. — Киев: Будівельник, 1977. — С. 145–147.
8. Сурмач Г. П. Опыт расчета смыва почв для построения комплекса противоэрозионных мероприятий / Г. П. Сурмач // Почвоведение. — 1979. — № 4. — С. 92–103.
9. Швец Г. И. Формирование водной эрозии, стока наносов и их оценка / Г. И. Швец — Л.: Гидрометеоздат, 1974. — 184 с.
10. Швец Г. И. Теоретические основы эрозиоведения / Г. И. Швец — Киев-Одесса: Вища школа, 1981. — 223 с.
11. De Roo A. P. J. LISEM: A physically-based hydrological and soil erosion model incorporated in a GIS / A. P. J. De Roo, C. G. Wesseling, N. H. D. T [et al] // J. J. Harts, H. F. L. Ottens, H. J. Scholten (eds), EGIS / MARY'94 Conference Proceedings. — Utrecht/Amsterdam: EGIS Foundation, 1994. — P. 207–216.
12. Foster G. R. Evaluating irregular slopes for soil loss prediction / Foster G. R., Wischmeier W. H. // Trans. Am. Soc. Agric. Engrs. — 1974. — 17. — P. 305–309.
13. Hofierka J. Soil water erosion modelling using GIS and aerial photographs / Hofierka J., Suri M. // Geographical Information. Second Joint European Conference & Exhibition on Geographical Information, Barcelona, Spain, — 1996. — P. 376–381.
14. Mitas L. Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention / Mitas L., Mitasova H. // Water Resources Research. — 1998. — № 3. — P. 505–516.
15. Renard K. G. RUSLE: Revised universal soil loss equation / Renard K. G., Foster G. R., Weesies G. A., Porter J. P. // J. Soil and Cons. — 1991. — V. 46. — P. 30–33.
16. Spanner M. A. Soil loss prediction in a Geographic Information System Format / M. A. Spanner, A. H. Strahler, J. E. Estes // Papers Selected for Presentation at the Seventeenth International Symposium on Remote Sensing of Environment. 89–102. 2–9 June 1982 Buenos Aires, Argentina. Ann Arbor, Mich., 1983. — 14 p.
17. Van Deursen W. P. A. Using the watershed tools for modeling the Rhine catchment / Van Deursen W. P. A., Kwadijk J. C. J. // J. J. Harts, H. F. L. Ottens, H. J. Scholten (eds), EGIS'92 Conference Proceedings, Utrecht- Amsterdam: EGIS Foundation, 1992. — P. 254–262.
18. Wischmeier W. H. Evaluation of factors in the soil-loss equation / W. H. Wischmeier, D. D. Smith, R. E. Uhland // Agricultural Engineering. — 1958. — V. 39. — P. 458–462.
19. Wischmeier W. H. Predicting rainfall erosion losses — a guide to conservation planning / Wischmeier W. H., Smith D. D. // Agriculture Handbook No.537. - Washington, D. C.: United States Department of Agriculture. — 1978. — 65 p.