

УДК 911.9:631.4:631.459

А. А. Светличный, докт. геогр. наук, профессор
А. В. Пяткова, канд. геогр. наук, доцент
Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова,
кафедра физической географии и природопользования,
Шампанский пер, 2, Одесса, 65058, Украина
svetlitchnyi.aa.od@gmail.com

ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ СМЫВА –АККУМУЛЯЦИИ ПОЧВЫ НА ОСНОВЕ ФИЗИКО-СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В статье представлены результаты оценки адекватности пространственного моделирования интенсивности склонового эрозионно-аккумулятивного процесса на основе ГИС-реализованной физико-статистической математической модели смыва-аккумуляции, разработанной на кафедре физической географии Одесского национального университета имени И. И. Мечникова. В качестве основы для оценки использованы результаты пространственного моделирования водной эрозии почв с использованием теоретической «физически обоснованной» Лимбургской модели водной эрозии (LISEM). на трех тестовых участках, площадью 8,5, 21,5 и 70 га, расположенных в пределах Восточно-Европейской равнины.

Ключевые слова: водная эрозия почв, физико-статистическая модель смыва-аккумуляции, Одесский национальный университет, пространственное моделирование, оценка адекватности, тестовые участки.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на очевидные успехи в математическом моделировании процесса водной эрозии на основе теоретического подхода, достигнутые в последние 2-3 десятилетия, практика почвозащитного проектирования в мире основывается на эмпирических математических моделях водной эрозии (или эрозионных потерь) почвы, преимущественно относящихся по классификации [9] к группе физико-статистических (Универсальное уравнение потерь почвы (USLE) и его модификации (USLE-M/dUSLE/MUSLE/RUSLE) в США и многих других странах мира, логико-математическая модель смыва почвы Г. И. Швебса в Украине, формула Г. П. Сурмача в Российской Федерации) либо к группе концептуальных математических моделей (формула И. К. Срибного в Украине). Известны рекомендации по использованию при противозерозионном проектировании даже формально-статистических моделей [11]. Причина существующего положения заключается в излишне высоких требованиях теоретических моделей водной эрозии почв к их информационному обеспечению, которые в настоящее время могут быть удовлетворены только по отдельным хорошо из-

ученным в рамках научно-исследовательских или мониторинговых программ склоновых или небольших балочных водосборов. Эмпирические же модели, как правило, ориентируются на стандартную и доступную информацию.

Однако, по-прежнему остается открытым вопрос о том, насколько эмпирические математические модели смыва (или эрозионных потерь) почвы удовлетворяют требованиям проектирования современных почвозащитных адаптивно-ландшафтных (контурно-мелиоративных, ландшафтно-экологических, точного земледелия) систем земледелия, оперирующих не осредненными по площади (как это было ранее) характеристиками, в том числе и интенсивности «смыва почвы», а нуждающихся в пространственно распределенной оценке и прогнозе, выполненном с учетом особенностей пространственной дифференциации всех значимых природных и хозяйственных факторов моделируемого процесса.

Пространственно-распределенная оценка и прогноз интенсивности водной эрозии почвы стали практически возможными на основе эмпирического подхода благодаря геоинформационным технологиям. Первый опыт ГИС-реализации модели эрозионных потерь почвы (USLE) был предпринят еще в 1982 г. [17]. В настоящее время геоинформационные технологии применяются для пространственного моделирования водной эрозии в разных странах мира. Известен опыт применения одной из современных ГИС-версий Универсального уравнения эрозионных потерь почвы США (USLE-3D) в Украине [2]. В середине 90-х годов в Одесском государственном (ныне – национальном) университете имени И. И. Мечникова на базе ГИС-пакета PCRaster была выполнена [6] ГИС-реализация профильной версии модифицированного варианта логико-математической модели смыва почвы Г. И. Швевса [13, 14]. ГИС-реализация современной версии модели выполнена с использованием языка программирования *Basic* и аналитических возможностей свободно-распространяемого ГИС-пакета PCRaster [5]. Профильная версия модели прошла успешную верификацию по данным наблюдений на экспериментальных микроводосборах Богуславской полевой экспериментальной гидрометеорологической базы (Богуславской ПЭГМБ) УкрНИГМИ и Велико-Анадольской водно-балансовой станции, по данным наблюдений за выносом склоновых наносов за пределы экспериментальных водосборов через их замыкающие створы. К сожалению, наблюдения за смывом-аккумуляцией почвы в пределах площади водосборов в Украине не ведется. Результаты верификации пространственной версии модели смыва-аккумуляции с использованием точечных профильных данных по смыву почвы и аккумуляции склоновых наносов, полученных радиоцезиевым методом и методом магнитных трассеров, представлены в работе [10]. Однако, несмотря на обнадеживающие результаты верификации пространственной версии модели, задача оценки адекватности пространственной картины интенсивности смыва-аккумуляции, получаемой с использованием современных ГИС-реализованных моделей, по-прежнему остается нерешенной и ее решение представляет как научный, так и непосредственный практический интерес.

Именно оценка адекватности пространственного моделирования интенсивности смыва-аккумуляции на склонах на основе физико-статистической модели является *целью исследования*, результаты которого представлены в данной статье. В качестве *объекта исследования* выступает склоновый эрозионно-аккумулятивный процесс, в качестве *предмета* – адекватность отображения пространственной картины смыва-аккумуляции почвы на склонах с помощью физико-статистической математической модели смыва-аккумуляции почвы, разработанная на кафедре физической географии и природопользования ОНУ имени И. И. Мечникова.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В связи с отсутствием детальных данных объективного контроля пространственной изменчивости смыва-аккумуляции в пределах склона или балочного водосбора в качестве адекватной модели пространственного распределения смыва-аккумуляции в работе использованы результаты пространственного моделирования процесса водной эрозии с помощью детальной теоретической «физически обоснованной» пространственно-распределенной (2D) Лимбургской модели водной эрозии почв (LISEM) [16]. Подробное описание модели приведено в [8], в связи с чем здесь отметим лишь следующее. В основе модели лежат фундаментальные уравнения сохранения вещества и энергии (неразрывности и движения) для воды и наносов на склонах и в русловой сети в виде системы уравнений кинематической волны. Она детально описывает основные стадии эрозионно-аккумулятивного процесса на склоне, включая процессы стокообразования, поверхностно-склоновой и русловой эрозии, транспорта и отложения склоновых и русловых наносов. Модель разработана и ГИС-реализована в Университете г. Утрехта, Нидерланды, однако хорошо зарекомендовала себя во многих странах мира. Ее калибровка и верификация для природно-хозяйственных условий лесостепи Украины выполнена по данным наблюдений на экспериментальных микроводосборах Богуславской НИГЛ в рамках проекта SPARTACUS [18]. Необходимо подчеркнуть, что LISEM описывает процесс водной эрозии при выпадении отдельного смывообразующего ливня, в связи с чем для сопоставимости результатов моделирования смыва-аккумуляции с результатами расчета среднесезонных величин ливневого смыва-аккумуляции с помощью физико-статистической модели, расчеты по LISEM выполнялись для расчетного ливня 5%-ой обеспеченности, смыв от которого соизмерим с величинами среднегодовых эрозионных потерь почвы [6, 8, 18].

Используемая в работе физико-статистическая эмпирическая модель смыва-аккумуляции представляет собой модифицированный пространственно-распределенный ГИС-реализованный вариант логико-математической модели поверхностного смыва почвы Г. И. Швевса [13, 14], разработанный на кафедре физической географии и природопользования ОНУ имени И. И. Мечникова [6, 7, 8, 4, 5] на основе выполненных теоретических и полевых, в том числе экс-

периментальных, исследований [6, 7, 3, 12]. Модель учитывает нестационарность процесса склонового нанообразования и обусловленное этим наличие на склоне зон как полного, так и неполного стока, пространственную изменчивость в пределах склонов основных факторов моделируемого процесса (уклонов, экспозиции и формы склонов, структуры временной эрозионной сети, противоэрозионной стойкости почв, хозяйственной деятельности). Основу математической модели ливневого смыва-аккумуляции, являющейся составной частью физико-статистической модели, которая использована в настоящем исследовании, составляет система уравнений, приведенная в [5, 10].

В качестве тестовых участков для проведения оценки выбраны: лог Плоский – экспериментальный склоновый водосбор Богуславской ПЭГМБ (юг Киевской области) с площадью водосбора 8,5 га; экспериментальный участок в балке Лабушна на территории полевого физико-географического стационара ОНУ имени И. И. Мечникова площадью 21,5 га (север Одесской области) и два приустьевых склона балочного водосбора Грачева Лощина (Курская область, РФ) площадью около 70 га.

Лог Плоский представляет собой верхнюю безрусловую часть (по сути, склон) балки Довжик со средним уклоном 0,025 (максимальным 0,05-0,06), близкой к прямой продольной макроформе склона с выраженной продольной и поперечной волнистостью. Средняя длина лога около 400 м. Почвенный покров представлен темно-серыми оподзоленными крупнопылевато-легкосуглинистыми почвами на лессах, в нижней части слабо- и среднесмытыми. Водосбор лога полностью распахивается и используется для выращивания сельскохозяйственных культур в полевом севообороте.

Экспериментальный участок в балке Лабушна, расположенной в пределах южных отрогов Подольской возвышенности, представляет собой склон северо-восточной экспозиции со средним уклоном 0,09 (максимальным 0,14) и с выраженной поперечной волнистостью. Длина участка 730 м. Почвенный покров представлен черноземом реградированным на лессовидных суглинках разной степени смытости. Участок полностью распахивается и используется под сельскохозяйственные культуры, в том числе пропашные.

Тестовый участок в балке Грачева Лощина представлен двумя противоположными склонами юго-западной (левый) и северо-восточной (правый) экспозиций. Балка Грачева Лощина находится в пределах типичной лесостепи Среднерусской возвышенности. Склоны имеют длину около 550 м, средние уклоны около 0,06, преимущественно выпуклую форму продольного профиля – в верхней части склонов уклоны составляют 0,02-0,03, в нижней возрастают до 0,11-0,14. Склоны почти полностью (кроме узких подножий) распахиваются и используются для выращивания сельскохозяйственных культур в севообороте: 10% – многолетние травы, 15% – однолетние травы, 15% – озимые, 20% – яровые, 30% – пропашные, 10% – пар.

На склоне юго-западной экспозиции распространены черноземы выщелоченные тяжелосуглинистые среднесильные, на склоне северо-восточной экс-

позиции – черноземы типичные мощные разной степени эродированности. В нижних частях склонов вдоль нижней границе пашни встречаются смыто-намытые разности; для днища балки характерны дерновые сильнонамытые тяжелосуглинистые почвы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты моделирования смыва-аккумуляции почвы в пределах тестовых водосборов с помощью теоретической и физико-статистической моделей представлены на рис. 1-3.

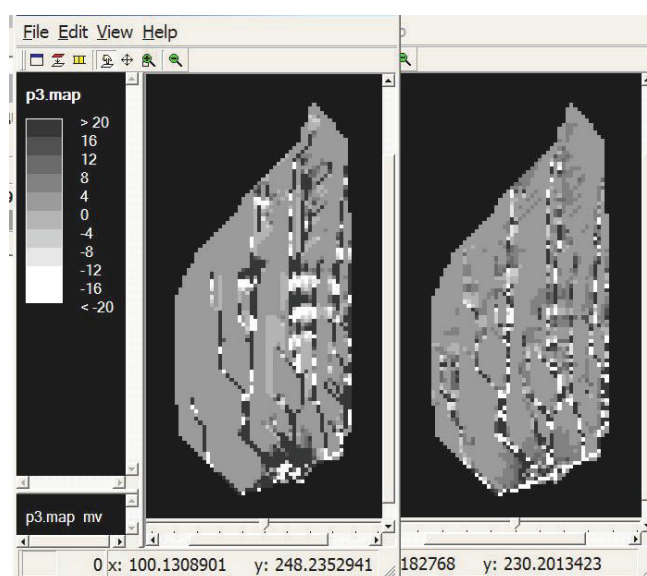


Рис. 1. Пространственное распределение смыва-аккумуляции ($t/га$) в пределах лога Плоского на основе теоретической (слева) и физико-статистической (справа) моделей

Исходными данными для теоретической модели послужили плювиограмма расчетного ливня 5%-ой обеспеченности и набор растровых карт пространственного распределения характеристик участков и параметров модели, перечень которых приведен в табл. 1. Исходными данными для физико-статистической модели послужили: значение нормы гидрометеорологического фактора ливневого смыва почвы ($K_{зм}$), максимальная 10-ти минутная обеспеченность ливня 5%-ой обеспеченности по ближайшей метеостанции и набор цифровых растровых карт, перечень которых также дан в табл. 1. Размер ячейки растра для лога Плоского и участка в урочище Лабушна – 5 м x 5 м, участка в балке Грачева лощина – 10 м x 10 м. Размеры растров для лога Плоского 140 x 190, для участка в урочище Лабушна – 142 x 61, для склонов в балке Грачева Лощина –

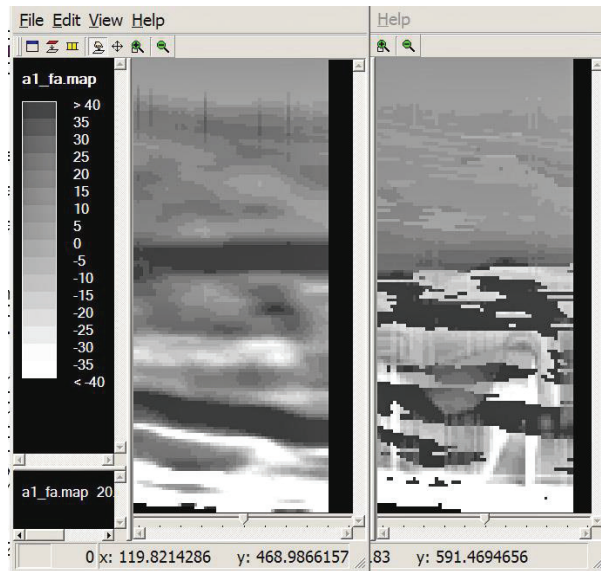


Рис. 2. Пространственное распределение смыва-аккумуляции (в т/га) в пределах участка в балке Лабушина на основе теоретической (слева) и физико-статистической (справа) моделей

130 x 140. Отметим, что перечень карт почвенных параметров LISEM дан для одной из наиболее простых по структуре математических моделей инфильтрационных потерь стока – однослойной модели Грина-Эмпта, использованной в данной работе. В случае использования в качестве модели инфильтрационных

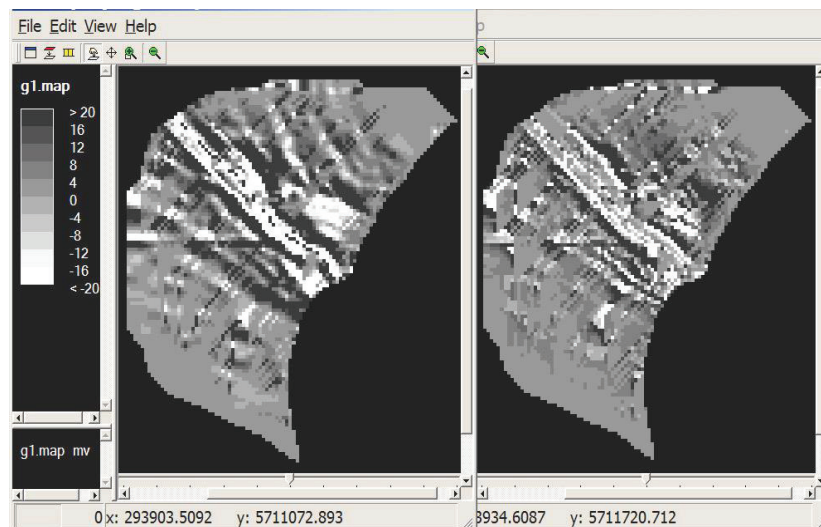


Рис. 3. Пространственное распределение смыва-аккумуляции (в т/га) в пределах участка в балке Грачева Лощина на основе теоретической (слева) и физико-статистической (справа) моделей

Таблица 1

Перечень входных пространственно-распределенных данных для LISEM и физико-статистической модели смыва-аккумуляции ОНУ

Номер по порядку	Наименования входных карт для LISEM	Наименования входных карт для физико-статистической модели ОНУ
1	Границ участка (area)	Цифровая модель рельефа (ЦМР)
2	Уклонов участка (grad)	Карта генетических типов-подтипов почв
3	Местных линий тока (ldd)	Карта эродированности почвенного покрова
4	Параметра, характеризующего микрорельеф поверхности участка (tr)	Карта севооборотных участков
5	Механического сцепления поверхностного слоя оголенной почвы участка (coh)	Карта противоэрозионных мероприятий
6	Дополнительного сцепления поверхностного слоя почвы, обусловленного растительностью (cohadd)	Коэффициента шероховатости Маннинга в пределах участка
7	Устойчивости почвенных агрегатов в пределах участка (aggrgrab)	Карта водоразделов
8	Средневзвешенный диаметр перемещаемых водой почвенных отдельностей (d50)	
9	Коэффициента шероховатости Маннинга в пределах участка (n)	
10	Водопроницаемости почвы при полном насыщении (psi1)	
11	Скважности почвы (thetai1)	
12	Влажности активного слоя почвы на момент выпадения расчетного ливня (thetas1)	
13	Мощности почвенного слоя (soildep1)	
14	Высоты растительного покрова (ch)	
15	Линий тока в пределах русла (chanldd)	
16	Проективного покрытия растительного покрова (per)	
17	Индекса листовой поверхности (LAI)	
18	Ширины русла (chanwidt)	
19	Коэффициента заложения откосов русла (chan-side)	
20	Уклонов постоянной русловой сети (если имеется) (changrad)	
21	Механического сцепления грунтов дна русла (chancoh)	
22	Коэффициента шероховатости Маннинга в русле (chanman)	

потерь двухслойной модели Грина-Эмпта или уравнения влагопереноса число параметров будет существенно большим.

Необходимо отметить, что к перечню входных пространственно-распределенных данных для физико-статистической модели, строго говоря, можно добавить поименованные применительно к LISEM карты уклонов и местных линий тока участка, а также карту экспозиции склонов, которые строятся в среде программного комплекса физико-статистической модели автоматически (программными средствами в пакетном режиме) на основе ЦМР, а также карту частной характеристики относительной смываемости, которая автоматически строится на основе почвенных карт. Однако даже в этом случае объем входных данных физико-статистической и теоретической моделей несопоставимо. К тому же входные данные физико-статистической модели – это стандартная и, как правило, легко доступная информация.

Цифровые модели рельефа, которые в используемых математических моделях являются основой построения в интерактивном (в LISEM) или автоматическом (в физико-статистической модели) карт морфометрических характеристик для участков в балках Лабушна и Грачева Лощина, построены на основе топографических карт масштаба 1:10 000 с шагом между основными горизонталями 1 м, для лога Плоского – на основе карты рельефа лога масштаба 1:1000 с сечением рельефа 0,2 м, построенной на основе специальной инструментальной съемки, выполненной сотрудниками УкрНИГМИ [18]. Методика построения ЦМР – экранное дигитизирование по предварительно сканированной картографической основе с последующей пространственной интерполяцией с использованием обыкновенного точечного кригинга.

Для построения цифровых карт почвенных параметров для лога Плоского и балки Грачевая Лощина использованы традиционные (бумажные) почвенные карты масштаба 1:10 000, для участка в балке Лабушна – материалы собственных полевых исследований.

Визуальное сопоставление пространственного распределения смыва-аккумуляции почвы в пределах тестовых участков, полученного с использованием физико-статистической и теоретической моделей (рис. 1-3) показало высокую степень их соответствия друг другу. Особенно наглядны в этом смысле результаты моделирования водной эрозии на логе Плоском, по которому в связи с наличием результатов детальной инструментальной съемки рельефа, построена более детальная, чем для остальных участков, цифровая модель рельефа. Здесь физико-статистическая модель фактически воспроизводит пространственную структуру склонового стекания и концентрацию смыва-аккумуляции в продольных склоновых ложбинах практически идентично тому, как это делает детальная теоретическая модель. При этом следует отметить, что вблизи водоразделов, в том числе и вторичных, физико-статистическая модель более адекватно воспроизводит моделируемый процесс, чем теоретическая. Одним из постулатов, положенных в основу LISEM (и большинства других тако-

го рода моделей), является положение о наличии некоторой критической мощности потока (линейно связанной с его скоростью), ниже которого смыв отсутствует. Фактически, это признание наличия приводораздельного «пояса отсутствия эрозии», в связи с чем на картах смыва-аккумуляции, построенной с помощью LISEM, в приводораздельных полосах, ширина которых измеряется десятками метров, смыв равен нулю. Карты же смыва-аккумуляции, построенные с помощью физико-статистической модели показывают здесь плавное увеличение смыва вниз по склону непосредственно от линии водораздела.

Для количественной оценки соответствия пространственного распределения смыва-аккумуляции на склонах, моделируемого физико-статистической моделью распределению, моделируемому теоретической физически-обоснованной моделью, использован коэффициент корреляции знаков, или коэффициент Фехнера, основанный на оценке степени согласованности направлений отклонений индивидуальных значений факторного и результативного признаков от соответствующих средних. Именно этот показатель на наш взгляд наилучшим образом способен оценить соответствие двух пространственных распределений, абстрагируясь от их абсолютных значений. Коэффициент Фехнера вычисляется по формуле:

$$KF = \frac{n_a - n_b}{n_a + n_b}, \quad (1)$$

где n_a – число совпадений знаков отклонений индивидуальных величин от средней; n_b – число несовпадений.

Коэффициент Фехнера может принимать значения от -1 до +1. В соответствии с [1] значения KF в диапазоне 0,3-0,7 (по модулю) свидетельствуют о тесной связи, в диапазоне 0,7-1,0 – об очень тесной связи между переменными (в данном случае – пространственными распределениями).

Значения коэффициента Фехнера, вычисленные для пар пространственных распределений смыва-аккумуляции, полученных с использованием физико-статистической и теоретической моделей для трех тестовых участков, находятся в диапазоне 0,54-0,66, что свидетельствует о высокой тесноте связи между этими распределениями

ВЫВОДЫ

Оценка моделирования пространственного распределения смыва-аккумуляции на склонах с помощью физико-статистической эмпирической модели, разработанной на кафедре физической географии ОНУ имени И. И. Мечникова, выполненная на основе сопоставления результатов моделирования с пространственным распределением смыва-аккумуляции, полученного с использованием теоретической физически обоснованной пространственно-распределенной модели водной эрозии (LISEM) по трем тестовым участкам площадью 8,5, 21,5 и 70 га, показала ее высокую адекватность. Учитывая ре-

зультаты ранее проведенной верификации модели по данным наблюдений за смывами почвы в замыкающих створах склоновых водосборов и с использованием точечных данных, полученных методами радиоцезиевым и магнитных трассеров, можно утверждать, что несмотря на весьма умеренные требования к входным данным, ориентированные на стандартную и легко доступную информацию, физико-статистическая эмпирическая модель смыва-аккумуляции ОНУ адекватно отображает результаты эрозионно-аккумулятивного процесса на склоне и может быть рекомендована для использования при решении различных задач, связанных с оптимизацией использования эрозионно-опасных земель, в том числе и при проектировании адаптивно-ландшафтных систем земледелия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гинзбург А. И. Статистика [Текст] / СПб. : Питер, 2009. – 128 с.
2. Ковальчук І. П. Геопросторове моделювання потенціалу розвитку деградаційних процесів на орних землях [Текст] / І. П. Ковальчук, Т. О. Євсюков, О. С. Мкртчян, Н. І. Лобанська // Землеустрій і кадастр: наук.-вироб. журнал. – К. : Урожай, 2009. – Вип. 4 – С. 72-82.
3. Прокопенко С. С. Оценка среднего годового весеннего смыва почвы для территории Добрянской оросительной системы [Текст] / С. С. Прокопенко // Комплекс первоочередных и перспективных научных и практических задач по мелиоративным мероприятиям на Юге Украины. – Херсон, 1986. – С. 70-71.
4. Пяткова А. В. Особенности моделирования пространственной изменчивости факторов водной эрозии почв [Текст] / А. В. Пяткова // Вісник ОНУ. – Серія географічні та геологічні науки. – 2008. – Том 13. – Вип. 6. – С. 156-163.
5. Пяткова 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 [Текст] / А. В. Пяткова – Одеса: ФОП Попова Н. М., 2011. – 20 с.
6. Світличний О. О. Кількісна оцінка характеристик схилового ерозійного процесу і питання оптимізації використання ерозійно-небезпечних земель: автореф. дис. ... докт. геогр. наук: 11.00.11 [Текст] / О. О. Світличний. – Одеса: Одеський державний університет ім. І. І. Мечникова, 1995. – 47 с.
7. Светличный А. А. Принципы совершенствования эмпирических моделей смыва почвы [Текст] / А. А. Светличный // Почвоведение. – 1999. – № 8. – С. 1015–1023.
8. Светличный А. А. Эрозиоведение: теоретические и прикладные аспекты [Текст]: / А. А. Светличный, С. Г. Черный, Г. И. Швец. – Сумы: ИТД «Университетская книга», 2004. – 410 с.
9. 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.
10. 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. – Серія географічні та геологічні науки. – 2013. – Том 18. – Вип. 3. – С. 38-48.
11. Справочник по почвозащитному земледелию [Текст] / Под ред. И. Н. Безручко, Л. Я. Мильчевской. – Киев: Урожай, 1990. – 278 с.
12. Чорний С. Г. Теоретичні та прикладні основи раціонального використання ґрунтів силових зрошуваних агро ландшафтів південного та сухого степу України : автореф. дисс. ... докт. с.-г. наук: 06.01.02 [Текст] / С. Г. Чорний. – Київ: НАУ, 1997. – 48 с.
13. Швец Г. И. Формирование водной эрозии, стока наносов и их оценка [Текст] / Г. И. Швец. – Л. : Гидрометеониздат, 1974. – 184 с.
14. Швец Г. И. Теоретические основы эрозиоведения [Текст] / Г. И. Швец. – Киев-Одесса : Вища школа, 1981. – 223 с.
15. Швец Г. И. Гидрометеорологические условия формирования ливневой эрозии почв [Текст] / Г. И. Швец, А. А. Светличный, С. Г. Черный; Деп. ГНТБ Украины. – 1993. – 11 с. – Деп. 24.02.93, №261-Ук93.

16. De Roo A. P. J. LISEM: A single event physically-based hydrologic and soil erosion model for drainage basins. I: Theory, input and output [Текст] / A. P. J. De Roo, C. G. Wesseling, C. J. Ritserma // *Hydrological Processes*, 1996, 10. – P. 1107-1117.
17. Spanner M. A. Soil loss prediction in a Geographic Information System Format [Текст] / M. A. Spanner, A. H. Strahler, J. E. Estes // *Papers Selected for Presentation at the Seventeenth International Symposium on Remote Sensing of Environment*. 2–9 June 1982. Buenos Aires, Argentina. Ann Arbor, Mich. – P. 89-102.
18. SPARTACUS: Spatial redistribution of radionuclides within catchments: development of GIS-based models for decision support systems. EC Contract No. IC15-CT98-0215. Final Report [Текст] / 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.
19. Svetlitchnyi A. A. Spatial distribution of soil moisture content within catchments and its modelling on the basis topographic data [Текст] / A. A. Svetlitchnyi, S. V. Plotnitsky, O. Y. Stepovaya // *Journal of Hydrology*. – 2003. – № 277. – P. 50-60.

REFERENCES

1. Ginsburg, A. I. (2009), *Statistika [Statistics]*, Saint-Petersburg: Peter, 128 p.
2. Kovalchuk, I. P., Yevsyukov T. O., Mkrchian, O. S., Lyubanska, N. I. (2009), Heoprostorove modeliuвання potentsialu rozvytku dehradatsiinykh protsesiv na ornykh zemliakh [Geospatial modelling of potential development of degradation processes on the croplands], *Organisation of land use and cadaster*, Kyiv: Uroжай, issue 4, pp. 72-82.
3. Prokopenko, S. S. (1986), Otsenka srednego godovogo vesennego smyiva pochvyi dlya territorii Dobryanskoj orositelnoy sistemyi [Estimate of the average annual spring soil loss for the Dobrianka irrigation system area], *Proceedings of the conference «The complex of priority and promising scientific and practical tasks for reclamation measures in the southern Ukraine»*, Kherson, pp. 70-71.
4. Pyatkova, A. V. (2008), Osobennosti modelirovaniya vodnoy erosiyi s uchetom prostranstvennoy izmenchivosty eye faktorov [Features of soil water erosion modeling taking into account spatial changeability of its factors], *Bulletin of the Odessa National University, Series geographical and geological sciences*, volume 13, issue 6, pp.156-163.
5. P'yatkova, A. V. (2011), Prostorove modelyuvannya vodnoyi eroziyi g'runtu yak osnova naukovogo obg'runtuvannya racional'nogo vy'kory'stannya eroziyno-nebezpechny'h zemel' [The Spatial Modelling of Water Soil Erosion as the Basis of Scientific Justification of the Rational Use of Erosion Dangerous Lands], *Extended abstract of candidate's thesis*, Odesa: PPO Popova N. M., 20 p.
6. Svitlychnyy, O. O. (1995), Kil'kisna otsinka kharakterystyk skhylovoho eroziynoho protsesu i pytannya optymizatsiyi vykorystannya eroziyno-nebezpechnykh zemel' [The quantitative evaluation of the characteristics of the slope erosion process and the problem of optimization of use of erosion lands], *Extended abstract of Doctor's thesis*, Odessa: Odessa State I. I. Mechnikov's University, 47 p.
7. Svetlitchnyi, A. A. (1999), Printsipyi sovershenstvovaniya empiricheskikh modeley smyiva pochvyi [Principles of improving empirical soil loss models], *Pochvovedenie*, No. 8, Moscow, pp. 1015-1023.
8. Svetlitchnyi, A. A., Shvebs, H. I., Cherny, S. G. (2004), *Eroziovedenie: teoreticheskie i prikladnye aspekty [Soil erosion science: theoretical and applied aspects]*, Sumy: VTD «University Book», 410 p.
9. 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
10. Svetlitchnyi, A. A., Pyatkova, A. V., Plotnitskiy, S. V., Golosov, V. N., Zhidkin, A. P. (2013), Problema veryfykatsiyi prostranstvenno-raspredelelynykh matematicheskikh modeley vodnoy erosiyi pochv [The problem of verification of the spatially distributed mathematical models of water soil erosion], *Bulletin of the Odessa National University, Series geographical and geological sciences*, volume 18, issue 3, pp. 38-49.
11. Spravochnik po pochvozashchitnomu zemledeliyu [Hand-book of soil protection landuse] (1990), Bezruchko I. N., Milchevskaya L. Ya. (eds), Kyiv: Uroжай, 278 p.
12. Chorny, S. G. (1997), Teoretychni ta prykladni osnovy ratsional'noho vykorystannya hruntiv sylovykh zroshuvanykh ahro landshaftiv pviddennoho ta sukhoho stepu Ukrainy [Theoretical and practical basis for the rational use of soil irrigated agricultural landscapes of southern and dry steppes of Ukraine], *Extended abstract of Doctor's thesis*, Kyiv: NAU, 48 p.

13. Shvebs, H. I. (1974), *Formirovanie vodnoy erozii, stoka nanosov i ih otsenka* [Formation of water erosion, sediment yield and their evaluation], Leningrad: Hydrometeoizdat, 184 p.
14. Shvebs, H. I. (1981), *Teoreticheskie osnovyi eroziovedeniya* [The theoretical foundations of soil erosion science], Kiev-Odessa: Vyshcha shkola, 223 p.
15. Shvebs, H. I., Svetlitchnyi, A. A., Cherny, S. G. (1993), Gidrometeorologicheskie usloviya formirovaniya livnevoy erozii pochv [The hydrometeorological conditions of formation of storm erosion], *Dep. In GNTB Ukrainyi*, Dep. 24.02.93, No. 261-Uk93, Kyiv, 11 p.
16. De Roo, A. P. J., Wesseling, C. G., Ritserma, C. J. (1996) «LISEM: A single event physically-based hydrologic and soil erosion model for drainage basins. I: Theory, input and output» // *Hydrological Processes*, V.10, pp. 1107-1117.
17. Spanner, M. A., Strahler, A. H., Estes, J. E. (1982), Soil loss prediction in a Geographic Information System Format // Papers Selected for Presentation at the Seventeenth International Symposium on Remote Sensing of Environment. 2-9 June 1982. Buenos Aires, Argentina. Ann Arbor, Mich., pp. 89-102.
18. SPARTACUS: Spatial redistribution of radionuclides within catchments: development of GIS-based models for decision support systems. EC Contract No. IC15-CT98-0215. Final Report. (2000), Van der Perk, M., Svetlitchnyi, A. A., Den Besten, J. W. and Wielinga, A. (eds), Utrecht: Utrecht Centre for Environmental and Landscape Dynamics Faculty of Geographical Sciences, Utrecht University, The Netherlands, 165 p.
19. Svetlitchnyi, A. A., Plotnitsky, S. V., Stepovaya, O. Y. (2003), «Spatial distribution of soil moisture content within catchments and its modelling on the basis topographic data» // *Journal of Hydrology*, № 277, pp. 50-60.

Поступила 02. 10. 2017

О. О. Світличний, докт. геогр. наук, професор
А. В. П'яткова, канд. геогр. наук, доцент
Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,
кафедра фізичної географії та природокористування,
Шампанський пров, 2, Одеса, 65058, Україна
svetlitchnyi.aa.od@gmail.com

ОЦІНКА АДЕКВАТНОСТІ ПРОСТОРОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ЗМИВУ-АКУМУЛЯЦІЇ ҐРУНТУ НА ОСНОВІ ФІЗИКО-СТАТИСТИЧНОЇ МОДЕЛІ

Резюме

У статті представлені результати оцінки адекватності просторового моделювання інтенсивності схилового ерозійно-аккумулятивного процесу на основі ГІС-реалізованої фізико-статистичної математичної моделі змиву-аккумуляції, розробленої на кафедрі фізичної географії ОНУ імені І.І. Мечникова. В якості основи для оцінки використані результати просторового моделювання водної ерозії ґрунтів з використанням теоретичної («фізично обґрунтованої») Лімбургської моделі водної ерозії (LISEM) на трьох тестових ділянках, площею 8,5, 21,5 та 70 га, розташованих у межах Східно-Європейської рівнини.

Ключові слова: водна ерозія ґрунтів, фізико-статистична модель змиву-аккумуляції, Одеський національний університет, просторове моделювання, оцінка адекватності, тестові ділянки.

A. A. Svetlitchnyi

A. V. Pyatkova

Odessa I. I. Mechnikov National University,
Department Physical Geography and Environmental Sciences,
Shampanskiy per, 2, Odessa, 65058, Ukraine
svetlitchnyi.aa.od@gmail.com

EVALUATION OF THE ADEQUACY OF SPATIAL MODELING OF INTENSITY OF SOIL EROSION-ACCUMULATION ON THE BASIS OF PHYSICAL-STATISTICAL MODEL

Abstract

Problem Statement and Purpose. The practice of soil conservation in the world and in Ukraine is based on empirical, mostly physical-statistical, models of soil erosion that do not impose excessive requirements on the quantity and quality of input data. However, the question of the adequacy of spatial modeling, estimation and forecast of erosion-accumulation of soil using even modern GIS-implemented versions of empirical models remains open. *The aim* of the study is to assess the adequacy of the spatial simulation of intensity of erosion-accumulation on slope on the basis of the physical-statistical model developed at the Odessa I. I. Mechnikov National University.

Data & Methods. In connection with the lack of objective data on the spatial variability of intensity of erosion-accumulation within the slopes as an adequate model of the spatial distribution of erosion-accumulation in the paper used the results of the spatial modeling of soil erosion-accumulation using the detailed theoretical «physically based» Limburg soil erosion model (LISEM). The assessment of model's adequacy is performed on three test plots with an area of 7.5, 21.5 and 70 ha, located within the forest-steppe zone of the East European Plain. The assessment was carried out both on the basis of a visual comparison of the maps of the spatial distribution of erosion-accumulation, and using the correlation coefficient of signs, or the Fechner coefficient.

Results. A visual comparison of the results of spatial modeling of erosion-accumulation of soil using the physical-statistical model of ONU and Limburg soil erosion model showed a high degree of correspondence between the spatial distributions obtained. This conclusion is also confirmed by high values of the Fechner coefficient for the pairs of spatial distributions of erosion-accumulation, which for all test areas are in the range 0.54-0.66.

Taking into account the results of the earlier verification of the model using data of observations on soil washouts from slope watersheds and point data obtained by the radio cesium method and the magnetic tracers method, it can be argued that, despite very moderate input requirements oriented to standard and easily accessible information, physical-statistical empirical erosion-accumulation model developed in ONU adequately displays the results of erosion-accumulation process on a slope.

Key words: water erosion of soils, physical-statistical model erosion-accumulation, Odessa National University, spatial modeling, adequacy assessment, test areas.