

УДК 631.4:631.459

<sup>1</sup>Светличный А. А., доктор геогр. наук, проф.,<sup>1</sup>Пяткова А. В., канд. геогр. наук,<sup>1</sup>Плотницкий С. В., доцент,<sup>2</sup>Голосов В. Н., доктор геогр. наук, проф.,<sup>2</sup>Жидкин А. П., канд. геогр. наук<sup>1</sup>Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова,

кафедра физической географии и природопользования,

Шампанский пер., 2, Одесса, 65058, Украина

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,

Географический факультет, Ленинские горы, 1, Москва, ГСП-1, 119991, Россия;

Казанский Федеральный университет, Кремлёвская ул., 18, Казань,

420008, Россия

### ПРОБЛЕМА ВЕРИФИКАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВОДНОЙ ЭРОЗИИ ПОЧВ

Рассмотрена проблема верификации пространственно-распределенных математических моделей водной эрозии почв на основе данных о распределении смыва-аккумуляции в пределах склонов, как необходимое условие практического применения таких моделей. Представлены результаты верификации физико-статистической пространственно-распределенной модели смыва-аккумуляции, разработанной в Одесском национальном университете им. И. И. Мечникова на основе данных полевых исследований пространственного распределения эрозии-аккумуляции, полученных с использованием почвенно-морфологического, радиоцезиевого методов и метода магнитного трассера на экспериментальном водосборе Грачева Лощина (Курская область, Россия).

**Ключевые слова:** водная эрозия почв, пространственно-распределенные математические модели, верификация моделей, метод магнитного трассера, радиоцезиевый метод, Грачева Лощина

#### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует большое количество математических моделей расчета и прогноза водной эрозии, часть из которых рекомендуется к использованию или используется для решения различных задач по обеспечению рационального природопользования.

Обзор математических моделей водной эрозии дан, в частности, в работах [12, 7, 24]. По уровню теоретической обоснованности их можно разделить [11] на эмпирические, концептуальные и теоретические (физически обоснованные динамические, физико-математические), по пространственному разрешению – на модели с сосредоточенными параметрами (0-мерные), профильные (1-мерные) и пространственно-распределенные (2-мерные). Современным запросам практики, в частности, адаптивно-ландшафтного проектирования в сельском хозяйстве в наибольшей степени удовлетворяют пространственно-распределенные математические модели водной эрозии, к которым относятся, прежде всего, двухмерные

теоретические модели, такие как LISEM [17], EUROSEM [26], EROSION 2D/3D [29.], ГИС-реализация эрозионной модели WEPP [16, 28], эрозионный блок модели RUNTOX [23], а также некоторые эмпирические физико-статистические модели эрозионных потерь почвы: пространственная реализация Универсального уравнения потерь почвы (США) – RUSLE-3D [25] и двухмерная ГИС-реализация модифицированной логико-математической модели эрозионных потерь почвы [9, 12, 8 и др.].

Проблема верификации математических моделей водной эрозии, под которой будем понимать проверку их адекватности на основе данных наблюдений, всегда стояла достаточно остро в связи с ограниченностью массивов данных наблюдений за составляющими склонового эрозионно-аккумулятивного процесса. На постсоветском пространстве такие массивы можно сформировать преимущественно на основе данных наблюдений на стоковых площадках и склоновых водосборах стоковых и водно-балансовых станций системы Госкомгидромета. Однако, на этих станциях наблюдения за перераспределением продуктов эрозионного разрушения почвы по длине склонов не проводятся – на них ведутся наблюдения за стоком и смывом только в замыкающих створах экспериментальных водосборов. Верификация эрозионных моделей на основе этих данных может производиться только по сопоставлению расчетного смыва почвы с измеренным в замыкающих створах. Оставляя за рамками рассмотрения недостатки этого метода, можно считать, что, в принципе, для нульмерных моделей этих данных достаточно. Но данный подход не позволяет верифицировать пространственно-распределенные модели водной эрозии.

Возможность проверки достоверности расчетов темпов эрозионно-аккумулятивных процессов по площади пашни возникает при использовании результатов использования полевых методов исследования пространственного перераспределения наносов на склонах, а именно традиционного почвенно-морфологического метода, который позволяет судить о темпах перераспределения наносов за весь период распашки данного склона, а также получивших широкое распространение в последние десятилетия методов магнитного и радиоцезиевого трассеров, позволяющих на объективной основе оценить темпы перераспределения наносов, в том числе, и в пределах склонов за промежутки времени разной продолжительности: метод магнитного трассера – за долговременные периоды времени (110-150 лет) [3, 6, 22, 27] и радиоцезиевый – за последние десятилетия [5, 18, 1, 19 и др.].

В связи с имеющимися место достижениями в исследовании пространственного распределения на склонах смыва-аккумуляции актуальным является привлечение этих данных для верификации пространственно-распределенных математических моделей водной эрозии почв.

Целью настоящей статьи и является оценка возможностей верификации пространственно-распределенных математических моделей смыва с использованием данных о пространственном распределении в пределах склонов темпов смыва и аккумуляции, полученных на основе полевых исследований в пределах небольших балочных водосборов с использованием методов магнитного и радиоцезиевого трассеров.

## **ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ**

Верификация пространственно-распределенных математических моделей водной эрозии почв проводилась на двух противоположных склонах северной и южной экспозиций общей площадью около 70 га, расположенных в приустьевой части

водосбора балки Грачева Лощина. Балка расположена в 20 км к юг-юго-востоку от города Курска, в пределах опытно-производственного хозяйства Всероссийского научно-исследовательского института земледелия и защиты почв от эрозии (ВНИИЗ и ЗПЭ). Территория исследования относится к типичной лесостепи Среднерусской возвышенности. Рельеф региона представляет собой приподнятую пологоволнистую всхолмленную равнину, сильно расчлененную речными долинами и суходольной сетью. Исследованные склоны междуречий при длине около 550 м имеют средние уклоны 3-4 градуса, преимущественно выпуклую форму продольного профиля – в верхней части склонов уклоны составляют 1-2 градуса, в нижней возрастают до 7-10 градусов, Подножия склонов, а также борта и днище балки не распахиваются.

На склоне южной экспозиции преимущественно распространены черноземы выщелоченные тяжелосуглинистые среднемошные, мощные и сверхмощные. На склоне северной экспозиции развиты черноземы типичные мощные и сверхмощные; в нижних частях обоих склонов на нижней границе пашни встречаются смыто-намытые разности; для днища балки характерны дерновые сильнонамытые тяжелосуглинистые почвы.

Согласно имеющимся архивным данным распашка данной территории началась в 1857 году. До 1919 года применялся трехпольный севооборот: 30% – озимые; 40% – яровые; 30% – пар. С 1919 по 1959 годы: 20% – однолетние травы, 20% – озимые, 20% – яровые, 20% – пропашные, 20% – пар. С 1959 по 1985 годы: 10% – однолетние травы, 20% – озимые, 20% – яровые, 40% – пропашные, 10% – пар. С 1985 по настоящее время: 10% – многолетние травы, 15% – однолетние травы, 15% – озимые, 20% – яровые, 30% – пропашные, 10% – пар.

Исследование почвенного покрова проводилось в 2007 г. по 23-м разрезам, заложенным на склонах и в днище балки (рис. 1). По этим разрезам на основе почвенно-морфологического метода можно судить о темпах эрозии и аккумуляции за весь период распашки. Отбор образцов для определения запасов в почве трассеров проводился в непосредственной близости от разрезов, заложенных на склонах в пределах пашни, в трехкратной повторности при помощи почвенного бура для определения содержания сферических магнитных частиц и пробоотборником с внутренним диаметром 68 мм для проведения радиоизотопного анализа. Расчет темпов эрозионно-аккумулятивных процессов выполнен на основе сравнения запасов магнитного и радиоцезиевого трассеров на склонах и в днище с их опорными запасами на приводораздельных участках склонов, полученных при помощи отбора проб по спиральям в 12-кратной повторности.

*Метод магнитного трассера* основан на изучении перераспределении в почвах сферических магнитных частиц (СМЧ) – микротрассеров, имеющих преимущественно техногенное происхождение, связанное со сжиганием угля. СМЧ достаточно инертны, очень устойчивы к разрушениям и мигрируют исключительно в результате процессов эрозии. Определение содержания СМЧ в почвах основывается на выделении из почвенной массы магнитной фракции и определении под микроскопом доли в ней СМЧ. Особенности применения данного метода для оценки эрозионно-аккумулятивных процессов представлены в работах [3, 2, 22, 27 и др.].

На территории исследования основным источником СМЧ являлись паровые локомотивы, функционировавшие на железнодорожной ветке «Москва-Курск» с 1868 года [6]. Таким образом, метод магнитного трассера позволил оценить эрозионно-аккумулятивные процессы на участке исследования в среднем за длительный – почти полуторавековой период времени.

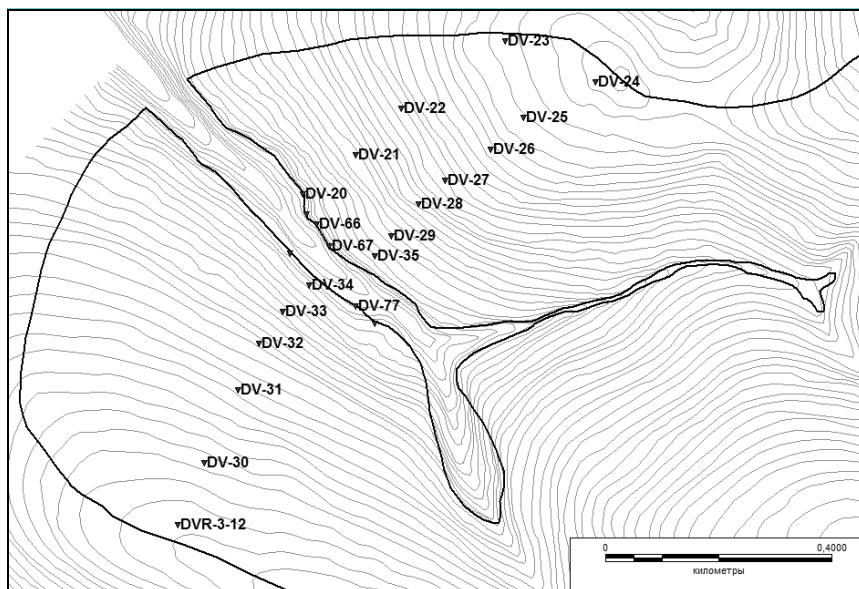


Рис. 1. Карта-схема расположения точек опробования в нижней части водосбора Грачева Лущина

*Радиоцезиевый метод* основан на использовании в качестве трассера изотопа  $^{137}\text{Cs}$ , который имеет антропогенное происхождение. Южный мегасклон Восточно-Европейской равнины, в том числе и центральная часть Курской области, был наиболее значительно загрязнён в результате аварии на Чернобыльской АЭС в апреле 1986 г с уровнями содержания  $^{137}\text{Cs}$  на порядок и более превышающими предшествующие глобальные выпадения изотопа, обусловленные проведением ядерных взрывов в открытой атмосфере. Возможность использования радиоизотопного метода на территориях с радиоактивным загрязнением Чернобыльского происхождения для оценки темпов эрозионно-аккумулятивных процессов обоснована в ряде исследований [20, 31, 5, 18, 1, 4, 19 и др.].

В качестве *эрозионной математической модели* – объекта верификации – была выбрана пространственная ГИС-реализованная физико-статистическая модель эрозии-аккумуляции, разработанная в Одесском национальном университете им. И. И. Мечникова [9, 12, 8 и др.] на базе известной логико-математической модели эрозионных потерь почвы Г.И.Швебса [13, 14]. Модель в отличие от других эмпирических моделей водной эрозии почв учитывает выраженную нестационарность склонового эрозионно-аккумулятивного процесса, диалектическое единство процессов смыва и аккумуляции на склоне, пространственную изменчивость основных факторов смыва-аккумуляции в пределах склонов, а также пространственную структуру склонового стекания. Модель опирается на обширную информационную базу, созданную на основе многолетних полевых исследований противоэрозионных свойств почв методом искусственного дождевания и данных наблюдений на опорной метеорологической сети.

Компьютерная реализация модели выполнена с использованием аналитических и языковых возможностей пакета пространственного анализа и моделирования

окружающей среды (для краткости – ГИС-пакета) PCRaster (Нидерланды) и языка программирования Visual Basic.

Входные данные для расчета смыва-аккумуляции с использованием модели представлены набором растровых цифровых карт с тождественными пространственными атрибутами, отображающими пространственное распределение в пределах склона или балочного водосбора морфометрических характеристик поверхности, противозерозионных свойств почв и особенностей использования земель. Первичный (базовый) набор цифровых карт представлен гидрологически-корректной цифровой моделью рельефа (ЦМР), почвенной картой с контурами эродированности и картами, отображающими хозяйственную нагрузку – виды землепользования, границы севооборотных участков, направление обработки, агротехнические противозерозионные мероприятия.

Особенно важную роль при подготовке входных пространственно-распределенных данных имеет построение качественной гидрологически-корректной цифровой модели рельефа, поскольку на ее основе программными средствами ГИС-пакета строятся карты уклонов, экспозиций, продольной и поперечной кривизны склонов и местных линий тока. ЦМР наряду с почвенной картой также используется при построении по разработанным методикам [10, 30] карт пространственного распределения в пределах склона ряда параметров модели.

К непространственным входным данным относятся среднегодовое значение (норма) гидрометеорологического фактора ливневого смыва ( $K_{ГМ}$ ) и гидрометеорологического фактора весеннего смыва ( $K_{ГМв}$ ), которые для Степи и Лесостепи Украины заданы в виде карт изолиний [12, 7]. Для других регионов они могут быть рассчитаны с использованием данных наблюдений на ближайших длиннорядных метеорологических станциях либо оценены с использованием метода географических аналогий.

Цифровая модель рельефа для водосбора Грачева Лощина построена на основе карты рельефа водосбора масштаба 1:10000 с сечением рельефа 1 м. Для оцифровки горизонталей рельефа и координатной привязки использован ГИС-пакет MapInfo Professional. Пространственная интерполяция и построение ЦМР выполнена методом обыкновенного точечного Кригинга с использованием гауссовской вариограммной модели с помощью программного модуля Gstat, являющегося частью пакета PCRaster. Цифровая почвенная карта построена в среде ГИС-пакета MapInfo Professional в векторном формате, после чего конвертирована в растровый формат пакета PCRaster. Третьей базовой цифровой картой, построенной для моделирования эрозии-аккумуляции в пределах водосбора Грачева Лощина, является карта землепользования, на которой выделено два ареала – пашня (на склонах) и луг (на бортах и в днище балки). Методика построения цифровой карты землепользования такая же, как и почвенной карты. Размер ячейки всех растровых карт – 10 м, размер растра – 130 строк на 140 столбцов, то есть 18200 ячеек.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 2 представлена карта нормы годового смыва-аккумуляции в пределах двух нижних склонов водосбора балки Грачева Лощина, построенная программными средствами ГИС-пакета PCRaster как результат пространственного моделирования водной эрозии в пределах этого водосбора. Значения гидрометеорологических факторов ливневого и весеннего смыва определены, учитывая близость географического расположения объекта исследований от границ Украины, путем

экстраполяции данных карт этих параметров в пределах территории Украины, помещенных, в частности, в [7], с учетом имеющихся карт атмосферных осадков, склонового стока и почвенного покрова.

На карте расчетной нормы смыва-аккумуляции почвы (рис. 2) на фоне высокой пространственной изменчивости интенсивности смыва и аккумуляции в средних и нижних частях склонов имеет место отчетливое чередование полос повышенных и пониженных величин смыва, вплоть до отрицательных значений (аккумуляции), то есть прослеживается «волнистость» в распределении интенсивности водной эрозии вдоль склонов.

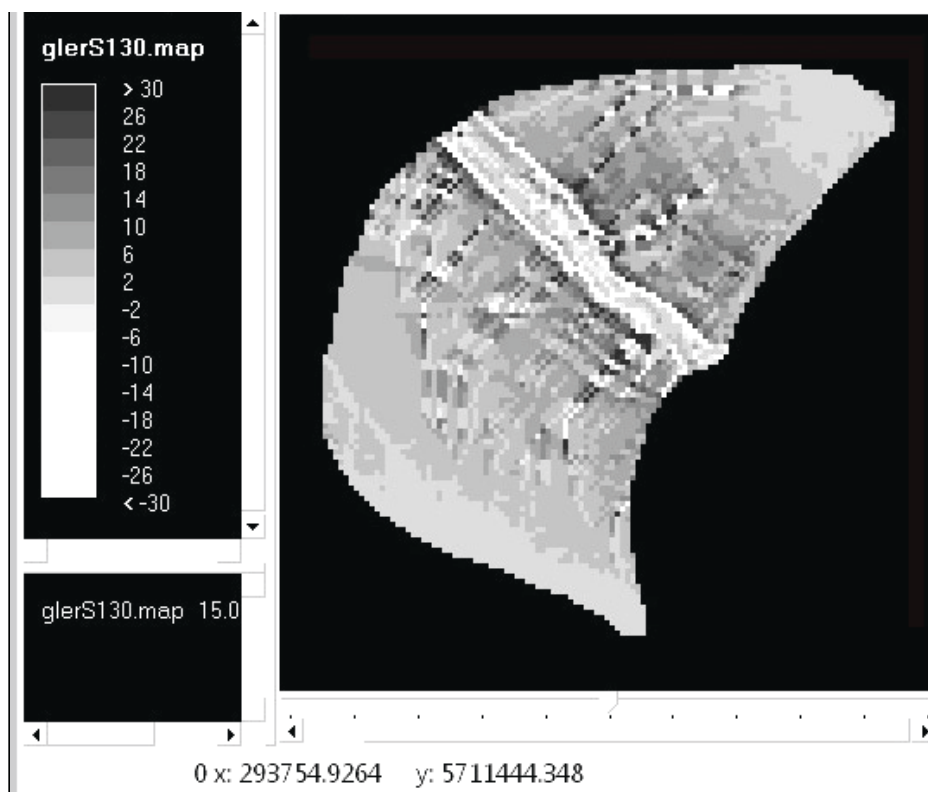


Рис. 2. Карта нормы годового смыва-аккумуляции в пределах нижней части водосбора Грачева Лущина, т/га/год

Еще одной важной особенностью пространственного распределения расчетных темпов водной эрозии в пределах территории моделирования является зона низких положительных (1-2 т/га/год) или различных по величине отрицательных значений в днище балки с выраженными полосами аккумуляции склоновых наносов на границе пашни и луга со среднегодовыми интенсивностями аккумуляции, выражающимися десятками т/га в год, что хорошо согласуется с ранее выявленной на основе использования радиоцезиевого метода значительной аккумуляцией наносов у подножия склонов и в днище балке [4].

Верификация модели выполнена с использованием двух наборов данных: мощностей гумусового горизонта почв по всем 23-м почвенным разрезам, как интегрального показателя смыва-аккумуляции за весь период распашки, и результатам оценки смыва-аккумуляции почвы за конкретные промежутки времени методом магнитного трассера и радиоцезиевого метода.

Сопоставление величин нормы эрозии почвы, снятых с карты смыва, и мощности почвенного горизонта АВ, выраженного в долях от мощности АВ вблизи водораздела, т.е. самого верхнего на каждом склоне почвенного разреза, расположенного на расстоянии около 30 м от водораздела, показала их в целом неплохое соответствие (рис. 3). Коэффициент детерминации связи  $R^2$  равен 0,62, коэффициент корреляции -0,79.

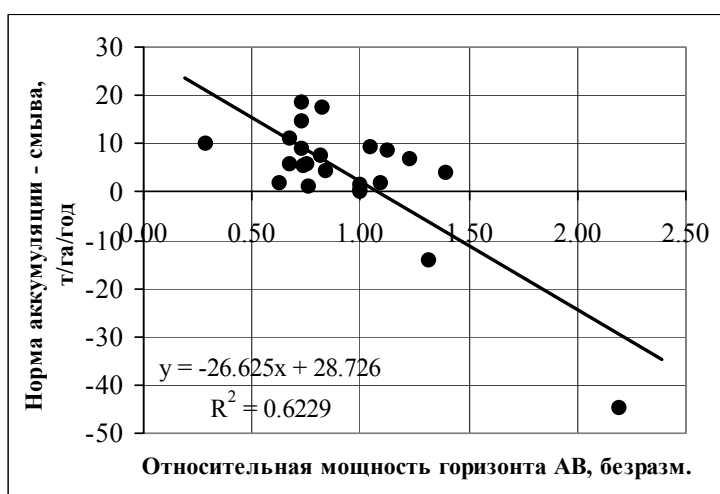


Рис. 3. График связи между расчетной нормой годового смыва почвы и относительной мощностью почвенного горизонта АВ по всей совокупности данных

Следует учитывать, что изменения мощности гумусового горизонта почвы зависят не только от интенсивности и характера эрозионно-аккумулятивного процесса на разных участках по длине склона, но и от механической эрозии, то есть перемещения пластов почвы при регулярной распашке. Также существует природная вариабельность мощностей почвенных горизонтов, обусловленная положением в пределах склона, различиями в увлажнении и другими факторами, определяющими водно-тепловой режим почвы.

Почвенно-морфологический метод характеризует суммарную деградацию почвенного покрова за весь период распашки, тогда как расчёты по модели – за период 1950-1990 гг. Кроме того, имеет место определенная сдвигка во времени между датами съемки рельефа Грачевой Лощины, при прочих равных условиях определяющего пространственное распределение смыва-аккумуляции на склоне, и почвенных исследований на водосборе. С учётом вышесказанного теснота связи графика на рис. 3 свидетельствует о достаточно высокой схожести расчётов эрозии/аккумуляции по математической модели с оценками, выполненными на основе почвенно-морфологического метода.

Сопоставление расчетного смыва-аккумуляции (РС) с соответствующими величинами, полученными по методу магнитного трассера (ММТ) и радиоцезиевому методу (РЦМ), проводилась по двум продольным профилям, расположенным на склонах южной (точки отбора DV-24-29, 35) и северной (точки отбора DVR3, DV30-34) экспозиций в пределах пашни (рис. 1). Средние по трансектам темпы смыва и аккумуляции наносов, рассчитанные на основе расчетного метода, и методов трассеров представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Темпы эрозии и аккумуляции на склонах северной и южной экспозиции, полученные на основе расчетных уравнений, методов магнитного и радио-цезиевого трассеров**

Темпы, т/га в год	Расчетный смыв почвы (1950-1990 гг)	На основе метода магнитного трассера (1868-2007 гг)	На основе радио-цезиевого метода (1986-2007 гг)
<b>Склон южной экспозиции</b>			
Средний смыв со склона	5,1	7,1	12,6
Средняя аккумуляция внутри склона	0,0	-1,7	-8,5
Средняя скорость выноса вещества за пределы склона	5,1	5,4	4,1
<b>Склон северной экспозиции</b>			
Средний смыв со склона	3,4	1,1	22,1
Средняя аккумуляция внутри склона	0,0	>1,1	-0,2
Средняя скорость выноса вещества за пределы склона	3,4	0,0	21,9

При сравнении полученных результатов важно учитывать, что применяемые методы характеризуют темпы эрозионно-аккумулятивных процессов за различные периоды времени. Метод магнитного трассера (ММТ) характеризует наиболее длительный интервал – за последние 140 лет, с момента строительства железной дороги в 1868 году до момента отбора проб в 2007. Радиоцезиевый метод (РЦМ) оценивает темпы эрозионно-аккумулятивных процессов с момента аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году до момента отбора проб (2007 г.). Для математической модели были использованы гидрометеорологические факторы ливневого и весеннего смыва, оцененные по данным наблюдений за 1950-1990 годы.

Исследования показали, что соответствие расчетных данных и методов трассеров различно для разных склонов. Высокое совпадение полученных темпов эрозии было отмечено на склоне южной экспозиции (табл.1). Особенно близкие значения были получены по средней скорости выноса наносов за пределы склона южной экспозиции: 5,1 т/га в год по РС, 5,4 т/га в год по ММТ и 4,1 т/га в год по РЦМ. Для склона северной экспозиции расчетные данные и ММТ указывают на низкие темпы смыва. Темпы эрозии по РС составили 3,4 т/га в год, по ММТ – 1,1 т/га в



год (табл. 1). В свою очередь темпы современной эрозии, полученные на основе РЦМ, оказались достаточно высоки и составили 22,1 т/га в год. Очевидно, в случае использования РЦМ темпы эрозии на данном склоне явно завышены, что можно объяснить вероятным смывом части свежевыпавшего  $^{137}\text{Cs}$  на данном склоне непосредственно с поверхности почвы, произошедшим в период между выпадением из атмосферы  $^{137}\text{Cs}$  в начале мая 1986 г. и первой обработкой почвы, которая обычно проводится в августе-сентябре, после которой происходит перемешивание  $^{137}\text{Cs}$  в пахотном слое. Именно среднее содержание изотопа в пахотном слое и является показателем доли потерь почв на эродированном участке по сравнению с участком, не затрагиваемым эрозионно-аккумулятивными процессами. Подобные ситуации, которые не могут быть заранее учтены при отсутствии данных фактических наблюдений, иногда возникают при использовании изотопа  $^{137}\text{Cs}$  в качестве трассера, что автоматически приводит к завышению среднесуточных темпов смыва, и должны учитываться при интерпретации полученных результатов [1].

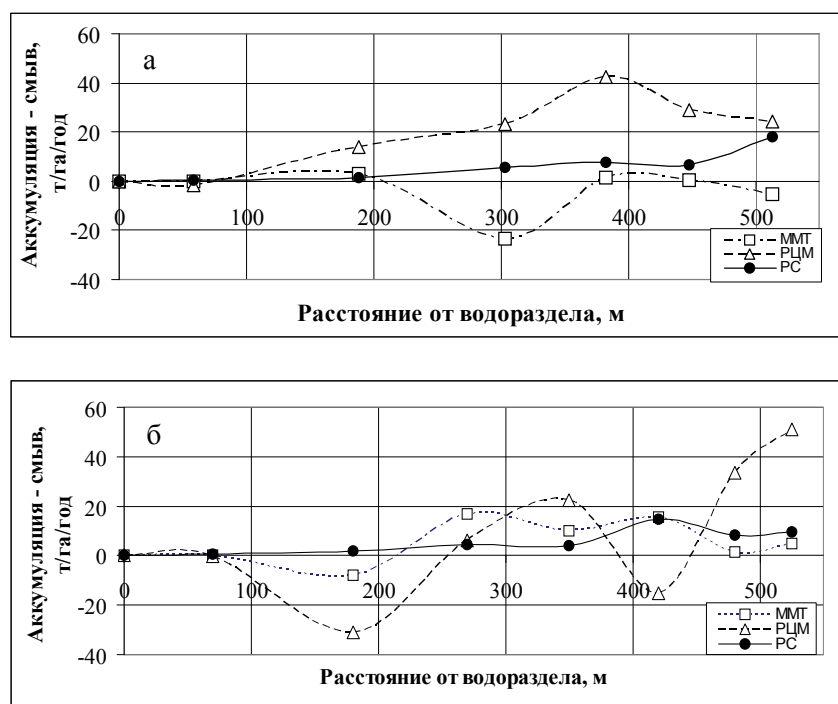


Рис. 4. График изменения по длине склона модулей годового смыва почвы/ на основе расчетных данных (PC), метода магнитного трассера (ММТ) и радиоцезиевого метода (РЦМ) для склонов северной (а) и южной (б) экспозиции

В нашем случае гораздо важнее наличие тесной связи в пространственном проявлении эрозионно-аккумулятивных процессов, установленной в пределах данного склона по результатам использования PC и РЦМ. На рис. 4 показаны кривые изменения по склонам модулей годового смыва почв, полученные на основе применявшихся методов. Коэффициент корреляции между кривыми изменения темпов смыва по длине по методу PC и РЦМ на склоне северной экспозиции (рис. 4 а)

составил 0,92, что свидетельствует о схожести пространственного положения зон смыва/намыва по длине склона, установленных на основе применения двух независимых методов.

На склоне южной экспозиции подобного совпадения между положением зон, установленных на основе использования РС и РЦМ, не отмечается. Некоторая корреляция ( $r=0,47$ ) скорее существует между методами РС и ММТ (рис. 4 б). Отчетливо для всех использованных методов выявляется волнообразность проявлений эрозионно-аккумулятивных процессов по длине склона: с усилением темпов эрозии в точках DV-26 (220 м от водораздела) и DV-28 (380 м от водораздела) до 16,8 и 15,5 т/га в год по ММТ и до 3,8 и 11,0 т/га в год по РС, и с относительно пониженными темпами эрозии в соседних точках DV-25, 27 и 29 (рис. 4 б). Существующая асинхронность в положении зон максимального и минимального смыва/аккумуляции для обоих склонов вполне может быть объяснена различиями во временных интервалах, для которых проводится оценка темпов смыва/намыва различными методами.

## ВЫВОДЫ

Верификация пространственной ГИС-реализованной математической модели водной эрозии с использованием данных почвенно-морфологических исследований, а также величин смыва-аккумуляции почвы в пределах нижней части водосбора балки Грачева Лощина, полученных методами магнитного и радиоцезиевого трассеров на склонах, показала, во-первых, в целом достаточно высокую достоверность результатов расчётов по модели темпов смыва и пространственного положения зон эрозии/аккумуляции, а, во-вторых, перспективность данного подхода к верификации пространственно-распределенных моделей водной эрозии почв и исследованию склонового эрозионно-аккумулятивного процесса в целом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Беляев В. Р., Маркелов М. В., Голосов В. Н., Бонте Ф., Иванова Н. Н.* Использование  $^{137}\text{Cs}$  для оценки современной агрогенной трансформации почвенного покрова в районах Чернобыльского загрязнения // Почвоведение. – 2003. – № 7. – С. 876-891.
2. *Геннадиев А. Н., Жидкин А. П., Олсон К. Р., Качинский В. Л.* Эрозия почв в различных условиях земледельческого использования: оценка методом магнитного трассера // Почвоведение. – 2010. – №9. – С. 1126-1134.
3. *Геннадиев А. Н., Чернянский С. С., Ковач Р. Г.* Сферические магнитные частицы как микрокомпоненты почв и трассеры массопереноса // Почвоведение. – 2004. – №5. – С. 566-580.
4. *Голосов В. Н., Беляев В. Р., Маркелов М. В., Шамишурина Е. Н.* Особенности перераспределения наносов на малом водосборе за различные периоды его земледельческого освоения (водосбор Грачева Лощина, Курская область) // Геоморфология. – 2012. – №1. – С. 25-35.
5. *Иванова Н. Н., Голосов В. Н., Маркелов М. В.* Сравнение методов оценки интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов на обрабатываемых почвах // Почвоведение. – 2000. – № 7. – С. 876 – 887.
6. *Жидкин А. П.* Оценка эрозионных процессов методом магнитного трассера в почвах малого водосбора (Курской области) // География и природные ресурсы. – 2010. – №1. – С. 149-156
7. *Лисецкий Ф. Н., Светличный А. А., Черный С. Г.* Современные проблемы эрозиоведения / Под ред. А. А. Светличного. – Белгород: Константа, 2012. – 456 с.
8. *Пяткова А. В.* Особенности моделирования водной эрозии с учетом пространственной изменчивости ее факторов // Метеорологія, кліматологія та гідрологія. Міжвід. наук. збірник України. Вип. 50. Частина II. – Одеса: Екологія, 2008. – С.437-442.
9. *Светличный А. А.* Принципы совершенствования эмпирических моделей смыва почвы // Почвоведение. – 1999. – № 8. – С. 1015-1023.

10. *Світличний О. О., Іванова А. В.* Принципи просторового моделювання гідрометеорологічних умов зливогого змиву ґрунту // Вісник Одеського національного університету імені І. І. Мечникова. Географічні та геологічні науки. – 2003. – Том 8. – Вип. 5. – С. 77-82.
11. *Светличный А. А.* Математическое моделирование водной эрозии: проблема классификации // Вісник Одеського національного університету імені І. І. Мечникова. Географічні та геологічні науки. – 2010. – Том 15. – Вип. 5. – С. 32-39.
12. *Светличный А. А., Черный С. Г., Швец Г. И.* Эрозиоведение: теоретические и прикладные аспекты. – Сумы: ВТД «Университетская книга», 2004. – 410 с.
13. *Швец Г. И.* Формирование водной эрозии, стока наносов и их оценка. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 184 с.
14. *Швец Г. И.* Теоретические основы эрозиоведения. – Киев-Одесса: Вища школа, 1980. – 224 с.
15. *Belyaev V. R., Golosov V. N., Kuznetsova J. S., Markelov M. V.* Quantitative assessment of effectiveness of soil conservation measures using a combination of <sup>137</sup>Cs radioactive tracer and conventional techniques // *Catena*. – 2009. – V. 79. – P. 214-227.
16. *Cochrane T. A., Flanagan D. C.* Assessing water erosion in small watersheds using WEPP with GIS and digital elevation models // *J. Soil & Water Conserv.* – 1999. – 54(4). – P. 678-685.
17. *De Roo A. P. J., Wesseling C. G., Cremers N. H. D. T., Offermans R. J. E., Ritserma C. J., Van Oostindie K.* 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, 1994. – P. 207-216.
18. *Golosov V. N.* Application of Chernobyl-derived <sup>137</sup>Cs for the assessment of soil redistribution within a cultivated field // *Soil & Tillage Research*. – 2003 – V. 69. – P. 85-98.
19. *Golosov V. N., Belyaev V. R., Markelov M. V.* Application of Chernobyl-derived <sup>137</sup>Cs fallout for sediment redistribution studies: lessons from European Russia // *Hydrological Processes*. – 2013 – V. 27. – P. 807-821.
20. *Higgitt D. L., Froehlich W., Walling D. E.* Applications and limitations of Chernobyl radiocesium measurements in a Carpathian erosion investigation, Poland // *Land degradation and rehabilitation*. – 1992. – V. 3. – P. 15-26.
21. *Hofierka J., Suri M.* Soil water erosion modelling using GIS and aerial photographs // *Geographical Information. Second Joint European Conference & Exhibition on Geographical Information, Barcelona, Spain, 1996*. – P. 376-381.
22. *Jones R. L., Olson K. R.* Fly ash use as a time marker in sedimentation studies // *Soil Science of America Journal*. – 1990. – V. 54. – P. 1393-1401.
23. *Kivva S. L., Zheleznyak M. I.* Two Dimensional Modeling of Rainfall Runoff and Sediment Transport in Small Catchment Areas // *International Journal of Fluid Mechanics Research*. – 2005. – V. 32/6. – P. 703 – 717.
24. *Merritt W. S., Letcher R. A., Jakeman A. J.* A review of erosion and sediment transport models // *Environmental Modelling & Software*. – 2003. – V. 18. – P. 761-799.
25. *Mitas L., Mitasova H.* Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention // *Water Resources Research*. – 1998. – № 3. – P. 505-516.
26. *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.
27. *Olson K. R., Gennadiyev A. N., Zhidkin A. P., Markelov M. V., Golosov V. N., Lang J. M.* Use of magnetic tracer and radio-caesium methods to determine past cropland soil erosion amounts and rates // *Catena*. – 2013. – V. 104. – P. 103-110.
28. *Renschler C. S.* Designing geo-spatial interfaces to scale process models: The GeoWEPP approach // *Hydrological Processes*. – 2003. – V. 17. – P. 1005-1017.
29. *Schmidt J., von Werner M., Michael A., Schmidt W.* Erosion-2D/3D: Ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser // *Dresden/Freiberg, Saxon State Agency for Agriculture/Saxon State Office for the Environment and Geology, 1996*. – 240 p.
30. *Svetlitchnyi A. A., Plotnitsky S. V., Stepovaya O. Y.* Spatial distribution of soil moisture content within catchments and its modelling on the basis topographic data // *Journal of Hydrology*. – 2003. – V. 277. – P. 50-60.
31. *Walling D. E., He Q.* Improved models for estimating soil erosion rates from caesium-137 measurements // *Journal of Environmental Quality*. – 1999. – V. 28. – P.611- 622.

**О. О. Світличний<sup>1</sup>, А. В. П'яткова<sup>1</sup>, С. В. Плотницький<sup>1</sup>, В. М. Голосов<sup>2</sup>,  
А. П. Жидкін<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,  
кафедра фізичної географії і природокористування,  
вул. Дворянська, 2, Одеса, 65026, Україна

<sup>2</sup>Московський державний університет імені М. В. Ломоносова,  
Географічний факультет,  
Ленінські гори, 1, Москва, ГСП-1, 119991, Росія

## **ПРОБЛЕМА ВЕРИФІКАЦІЇ ПРОСТОРОВО-РОЗПОДІЛЕНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ВОДНОЇ ЕРОЗІЇ ҐРУНТІВ**

### **Резюме**

Розглянуто проблему верифікації просторово-розподілених математичних моделей водної ерозії ґрунтів на основі даних про розподіл змиву-аккумуляції в межах схилів, як необхідна умова практичного застосування таких моделей. Представлені результати верифікації фізико-статистичної просторово-розподіленої моделі змиву-аккумуляції, розробленої в Одеському національному університеті імені І. І. Мечникова з використанням даних польових досліджень просторового розподілу ерозії-аккумуляції з використанням методу радіоцезієвого методу і магнітного трасера на експериментальному водозборі Грачова Лощина (Курська область, Росія).

**Ключові слова:** водна ерозія ґрунтів, просторово-розподілені математичні моделі, верифікація моделей, радіоцезієвий метод, метод магнітного трасера, Грачова Лощина.

**A. A. Svetlitchnyi<sup>1</sup>, A. V. Pyatkova<sup>1</sup>, S. V. Plotnitsky<sup>1</sup>, V. N. Golosov<sup>2</sup>,  
A. P. Zhidkin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Odessa National I. I. Mechnikov University,  
Department of Physical Geography and Nature Management,  
Dvorianskaya St., 2, Odessa, 65026, Ukraine

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University,  
Faculty of Geography,  
Lenin Hills, 1, Moscow, GSP-1, 119991, Russia

## **PROBLEM OF VERIFICATION OF DISTRIBUTED MATHEMATICAL MODELS OF WATER SOIL EROSION**

### **Abstract**

The problem of verification of spatially distributed mathematical models of water soil erosion on the basis of distributed data of soil erosion within the slopes, as a prerequisite for the practical application of such models. The results of the verification of the physically-statistical spatially distributed model of soil erosion developed in Odessa National University using data from field studies of the spatial distribution of soil erosion rates using radiocaesium method and the magnetic tracer method on an experimental watershed Gracheva Loshchina (Kursk, Russia).

**Keywords:** water erosion, spatially distributed mathematical models, verification of the models, radiocaesium method, magnetic tracer method, Gracheva Loshchina.