

МЕТОДИКА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.4.012:551.435.24(470.312)

© 2014 г. В.П. БОНДАРЕВ, В.Р. БЕЛЯЕВ, Н.Н. ИВАНОВА, О. ЭВРАР

ДОСТАВКА НАНОСОВ С ВОДОСБОРНЫХ СКЛОНОВ В ДОЛИНУ РЕКИ¹

Количественная оценка перемещения наносов со склонов в русла рек остается одной из актуальных проблем флювиальной геоморфологии. Возможность реалистично оценить величину этого перемещения может способствовать решению довольно большого количества теоретических и практических задач экологической геоморфологии: оценка эрозионного потенциала территории, интенсивность заиления русел рек, деформация первичного поля различных загрязнителей в пределах водосборного бассейна и т.д. В последние годы появляется все больше количественных данных о темпах смыва почвы со склонов. Однако их все еще недостаточно для достоверного расчета коэффициента доставки наносов в речные русла.

В связи с этим в настоящей работе авторами предлагается комплексная методика определения коэффициентов доставки наносов со склонов малой реки с использованием морфометрических методов, математического моделирования и прослеживания радиоизотопных трассеров для количественной оценки перераспределения наносов и связанных с ними загрязняющих веществ.

В основе исследования лежит несколько важных положений. Во-первых, это представления Р. Хортон, который выявил наличие закономерностей строения речной сети от самых малых ее элементов до наиболее крупных, придавая большое значение самым малым неразветвленным элементарным притокам. Во-вторых, положения о единстве эрозионно-аккумулятивных процессов в пределах всего речного бассейна, начиная с приводораздельных территорий и заканчивая руслом реки, которые были сформулированы Н.И. Маккавеевым. Кроме того, были учтены представления С.М. Шумма, Р.Дж. Чорли, Ю.Г. Симонова о том, что водосборный бассейн является геоморфологической системой с прямыми и обратными связями, имеющей сложную структуру и характеризующейся особенностями функционирования, на которые оказывают влияние природные и антропогенные условия и факторы.

В рамках изучения водосборных бассейнов, как сложных иерархических систем, можно выделить, как минимум, четыре пространственных иерархических уровня, каждому из которых соответствует свой комплекс процессов, развивающийся в характерном масштабе времени. При этом, склоновому уровню придается особый статус базового, с которого целесообразно начинать бассейновый анализ территории [1]. Именно этому вопросу и будет посвящен приведенный ниже анализ.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты РФФИ-НЦНИ 09-05-91057, РФФИ 10-05-00385, РФФИ 10-05-00357), программы Президента РФ для поддержки молодых ученых – кандидатов наук (проект МК-8023.2010.5) и программы Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (проект НШ-3284.2010.5).

Этапы анализа. Одним из перспективных путей оценки поступления наносов со склонов водосбора в долину и русло реки или временного водотока служит комплексный бассейновый подход, который включает в себя несколько этапов. В первую очередь создается морфометрическая картосхема изучаемого водосборного бассейна, и оцениваются морфометрические параметры склонов, с которых происходит поступление наносов. Далее, опираясь на полученные данные и используя одну из эрозионных моделей, нужно рассчитать количество наносов, поступающих в долину с каждого склона в отдельности и всех склонов вместе. При этом наибольшую сложность представляет не оценка мобилизации наносов на эродируемых частях склонов (эта задача с той или иной точностью решается многими расчетными моделями), а определение их переотложения на различных промежуточных рубежах стока по пути транспорта и вычисление результирующего коэффициента доставки в принимающую долину (эта задача не решается расчетными моделями без привлечения данных полевых исследований на ключевых участках). Наконец, с помощью некоторого маркера следует оценить адекватность эрозионной модели процессам, происходящим на реальных склонах.

Морфометрический анализ склонов водосборного бассейна. Основой исследования морфометрической структуры склонов водосборного бассейна может служить Хортон-анализ в модификации Стралера–Философова с использованием закономерностей структуры, полученных Ю.Г. Симоновым [2]. Такой подход наиболее формализован, и разные исследователи, работающие с одними и теми же топографическими материалами, получают одинаковые результаты. При этом на топографических картах м-ба 1:25000 отражена реальная устойчивая структура водосборного бассейна, а при переходе к м-бу 1:100000 идет потеря одного порядка с сохранением относительных морфометрических закономерностей. Морфометрический анализ водосборных бассейнов хорошо зарекомендовал себя при изучении перераспределения наносов в пределах водосборных бассейнов различного порядка. Немаловажно, что устойчивые закономерности были получены для разнообразных геоэкологических условий. Так, есть удачный опыт применения морфометрического анализа в балансовых исследованиях в сочетании с ^{137}Cs в качестве маркера перераспределения рыхлого материала в пределах малых бассейнов [3].

Заметим, что закономерности изменения морфометрических характеристик, структуры и динамики элементарных склонов в зависимости от порядка водотока, на который они опираются, до сих пор остаются недостаточно изученными. В то же время подобные исследования имеют конкретный геоморфологический смысл. Так, в работах R.R. Arnett и A.J. Conacher показано, что от этого обстоятельства изменяется тип склоновых процессов и почвообразования [4]. Ранее были проведены исследования морфометрических характеристик склонов, прилегающих к водотокам различного порядка в трех разных регионах европейской части России: верховья р. Клязьмы (Московская обл.), бассейн р. Сейм (Курская обл.), бассейны рек Северного Кавказа (Кабардино-Балкарская республика). Было показано, что в разнообразных по природным условиям регионах прослеживаются довольно устойчивые морфометрические закономерности для склонов в пределах малых водосборных бассейнов [5]. Заметим также, что форма продольного и поперечного профиля склоновых фасеток тоже значительно влияет на эту интенсивность.

Одним из комплексных морфометрических показателей, которые используются для оценки эрозионного потенциала склонов, является LS-фактор (фактор рельефа) американской расчетной модели USLE и ряда других производных моделей [6–8] – комплексный показатель влияния на интенсивность ливневой эрозии почв морфометрических характеристик склонов: длины, уклона, формы и экспозиции. Методика определения LS-фактора по морфометрическим данным, снятым с топографических карт, и принятые в используемой модификации модели расчетные формулы приводятся в работах [7, 9]. Значение LS-фактора, вычисленное для конкретного участка скло-

на, показывает, во сколько раз интенсивность смыва на единицу *эрозионного индекса осадков* (ЭИО) на данном участке склона при его морфометрических характеристиках превышает интенсивность смыва на единицу ЭИО со стоковой площадки с эталонными параметрами длины и уклона. Использование данного фактора в качестве показателя для создания классификации элементарных склоновых фасеток по интенсивности проявления эрозионных процессов предпочтительно, поскольку позволяет абстрагироваться от влияния таких параметров, как эродируемость почвы, почвозащитный коэффициент севооборота, противоэрозионные приемы обработки почвы и др., которые учтены в расчетных величинах смыва почвы.

Для анализа морфометрической структуры и эрозионного потенциала рельефа водосборных склонов бассейна р. Локны использовались программные пакеты MapInfo (векторизация топокарты м-ба 1:25000 для создания цифровой модели рельефа и подготовки тематических слоев, создание карт сети тальвегов и структуры элементарных склонов, получение их осредненных и экстремальных морфометрических характеристик, создание тематических карт на основе созданных классификаций), Surfer (создание цифровой модели рельефа, получение морфометрических характеристик тальвегов) и ArcGIS (создание цифровой модели рельефа, получение морфометрических характеристик склонов, визуализация расчетных данных по эмпирико-математической эрозионной модели, картографирование склонов водосборного бассейна), которые позволили работать с большими объемами информации и создать базу для морфодинамического анализа водосборного бассейна.

Эмпирико-математическая модель (ЭММ) оценки потенциальной интенсивности водной эрозии почв на склонах. Эмпирические модели основаны на экспериментально установленных статистических зависимостях между параметрами, определяющими условия протекания эрозионно-аккумулятивных процессов и их интенсивность. Мы применили эмпирико-математическую модель для расчета темпов смыва почвы с пахотных склонов, состоящую из двух основных компонент – модифицированного для использования на территории России Универсального уравнения эрозии почв [7, 8, 10] для расчета смыва дождевыми водами и адаптированной Г.А. Ларионовым [7] зависимости, разработанной в Государственном гидрологическом институте (ГГИ) для расчета смыва тальми водами [11, 12].

В основе обеих компонент модели лежат эмпирические зависимости между длиной и уклоном склона, осадками (запасом воды в снеге), характеристиками почвы, типом ее обработки, растительным покровом и темпами смыва. Данные зависимости были установлены, неоднократно модифицировались в результате исследований на опытных эрозионных площадках. В дальнейшем обе модели были существенно переработаны и снабжены необходимой справочно-информационной базой, охватывающей всю сельскохозяйственную территорию бывшего СССР [7, 9, 10].

Многие входные параметры для расчетной модели были получены в результате полевых исследований, анализа топографических карт и космических снимков (характеристики рельефа склонов, почв, современный характер землепользования) или анализа архивных данных (продолжительность активного освоения, характер землепользования в дореволюционный период). Другая часть материалов была любезно предоставлена сотрудниками НИЛ эрозии почв и русловых процессов географического факультета МГУ, ранее проводившими исследования на той же территории (характеристики почв, типичные севообороты советского периода). Также использовались параметры из базы данных, включенной в компьютерную реализацию модели (эрозионный потенциал осадков, запасы воды в снеге, эрозионные индексы культур и агрофонов).

Использование радиоизотопа-маркера для верификации эрозионной модели.

Одним из крайне опасных видов загрязнения окружающей среды является радиоактивное, в частности, относительно долгоживущим (период полураспада около 30.2 лет) изотопом искусственного происхождения ^{137}Cs . Его глобальное распространение –

следствие испытаний ядерного оружия в открытой атмосфере. Глобальное выпадение ^{137}Cs продолжалось с 1954 г. до конца 70-х гг. XX в. После запрета на проведение ядерных испытаний поступление ^{137}Cs в природную среду происходит преимущественно вследствие выбросов при нормальной работе АЭС [13]. Несмотря на то, что концентрации радиоактивных продуктов в выбросах ниже допустимых, в результате систематических выпадений и дальнейшего перераспределения экзогенными процессами локальное их накопление может быть негативным для биоты и геосистемы в целом. Однако наибольшие геоэкологические последствия вызывает распространение радионуклидов в результате аварий, в частности, аварии на Чернобыльской АЭС [13–15]. Последние события в Японии на атомной электростанции “Фукусима-1” демонстрируют, что аварийные выбросы радиоактивных загрязняющих веществ возможны даже в случае высокотехнологической защиты и качественного обслуживания атомных объектов.

Попавший в атмосферу радиоактивный цезий выпадает преимущественно с осадками. Поступая на поверхность почвы, он сорбируется почвенными частицами, в основном глинистыми минералами их тонких фракций, и в дальнейшем перемещается только вместе с ними. Это свойство ^{137}Cs сделало его надежным маркером мобилизации, транспорта и переотложения почвенно-грунтовых частиц. Сравнивая удельный запас изотопа в исследуемой точке с фоновым запасом на геоморфологически стабильном участке, характеризующем первоначальный уровень выпадения ^{137}Cs из атмосферы, можно оценить интенсивность перераспределения почвы и направленность процесса. Метод дает интегральную оценку перемещения материала, суммируя вклад таких процессов, как плоскостной и мелкоструйчатый смыл, ветровая эрозия, механическое перемещение почвы сельскохозяйственными орудиями [16–18]. Для перехода от относительных величин изменения запаса изотопа в опробованных точках к количественным оценкам средних темпов перераспределения почвы разработан целый ряд зависимостей, в разной степени учитывающих особенности выпадения и последующего перемещения ^{137}Cs [19–21]. Особенности применения метода, его преимущества и ограничения, методика полевых и лабораторных работ рассмотрены в ряде публикаций [16, 17, 22–27]. Помимо количественной оценки эрозионно-аккумулятивных процессов, поведение изотопа ^{137}Cs в речном бассейне может рассматриваться как аналог для любых загрязнителей, закрепляющихся в составе твердой фазы почвы [17, 18, 28, 29].

Таким образом, с одной стороны, изучение изотопа ^{137}Cs может служить примером для анализа деформации первичного поля загрязняющего вещества. С другой стороны, он может быть использован в качестве маркера перемещения наносов (в том числе и с другими сорбируемыми почвенными частицами загрязнителями). В этом качестве он был использован для калибровки эрозионной модели.

Регион и объекты исследования

Бассейн р. Плавы расположен в наиболее возвышенной северо-западной части Среднерусской возвышенности, характеризующейся холмисто-увалистым эрозионным рельефом с интенсивным долинно-балочным расчленением. Долина р. Плавы имеет субмеридиональное простирание, абс. отметки поверхности бассейна изменяются от 290 м в южной части до 137 м в северной. Площадь бассейна – 1856 км², длина главной долины около 90 км. В геолого-геоморфологическом отношении территория представляет собой эрозионно-денудационную моноклинально-пластовую возвышенность на северном крыле Воронежской антеклизы. Коренные породы (известняки, мергели и доломиты нижнего карбона) перекрыты относительно маломощным (первые метры) чехлом покровных лессовидных карбонатных суглинков. В почвенном покрове бассейна преобладают выщелоченные и оподзоленные черноземы. Значительная земельная освоенность региона (в периоды максимальной интенсивности сельскохозяйственного землепользования распахивалось до 80% площади бассейна), расчле-

ненный рельеф (средняя величина вертикального расчленения 60–70 м) и достаточное увлажнение (среднегодовой потенциал ливневых осадков 8.0 ед.) определяют активное проявление процессов эрозии на распаханых водосборных склонах [24, 30, 31]. В последние десятилетия часть пашни была заброшена и только недавно частично вновь включена в севооборот. Однако не менее 10–15% ранее распахиваемых земель до сих пор остаются залежью. Лесные массивы фрагментарно разбросаны по площади бассейна.

Ключевым участком для бассейнового анализа склоновой составляющей трансформации первичного поля загрязнения был выбран водосборный бассейн р. Локны (площадь водосбора 174.8 км², длина главной долины около 25 км), левого притока р. Плавы, впадающего в нее непосредственно в г. Плавске. Значительная часть района исследований была загрязнена радионуклидами в результате атмосферных выпадений продуктов аварии на Чернобыльской АЭС (так называемое “Плавское цезиевое пятно”).

Данный объект оптимален в качестве экспериментального водосбора-полигона, так как для этой территории имеется кондиционный картографический материал поля начального выпадения радиоизотопа, а также существует обширная база данных по темпам эрозионно-аккумулятивных процессов [23, 24, 30, 31]. За прошедшие с момента аварии 25 лет исходное поле загрязнения достаточно сильно трансформировано эрозионно-аккумулятивными процессами, и диапазон этой трансформации превышает величину исходной вариабельности выпадений.

Результаты исследования и их обсуждение

На первом этапе работ была составлена морфометрическая карта склонов водосборного бассейна р. Локны. В результате обработки топографической карты м-ба 1:100000 было выделено и проанализировано 1293 склона (табл. 1). При этом площади днищ долин не учитывались (в связи с масштабом исследования), а за нижнюю границу склоновой фасетки принимался тальвег принимающего водотока. Согласно полученным данным, р. Локна имеет пятый порядок. Так как использованный масштаб исследования предполагает в среднем потерю одного порядка, то в действительности водосборный бассейн р. Локны соответствует шестому порядку. Во избежание путаницы рассматривались порядки, отраженные на карте м-ба 1:100000, а элементарным склоновым фасеткам присвоены порядки эрозионной формы, на которую она опирается.

Большая часть элементарных склонов в водосборном бассейне р. Локны (62%) имеет первый порядок. С возрастанием порядка количество склонов уменьшается и на уровне четвертого–пятого порядка не превышает четырех процентов. Общая площадь склонов в бассейне 174.8 км², а распределение площадей склонов разных порядков примерно соответствует их распределению по количеству: наибольшая суммарная площадь (58%) соответствует первому порядку, далее она убывает и на уровне четвертого–пятого порядка составляет 5–7%.

Особый интерес представляет анализ площадей элементарных фасеток. Средняя их величина 0.14 км²±0.11 км². При этом средние площади склонов первых трех порядков приблизительно одинаковы. Вероятно, это связано со стабилизацией структуры верхних звеньев гидрографической сети в современных ландшафтно-климатических условиях. В то же время на последних порядках происходит увеличение средней площади. Обращает на себя внимание структура уклонов склонов (линий стока) – увеличение уклонов с возрастанием порядка. Можно предположить, что склоны четвертого–пятого порядка имеют больший потенциал развития линейной и плоскостной эрозии. Об этом же свидетельствует и возрастание средней величины фактора рельефа эрозионной модели (LS-фактора) с ростом порядка склона от 1 до 2.

На основе полученных морфометрических данных, с помощью модифицированной модели Г.А. Ларионова [7] проведена количественная оценка потенциального

Таблица 1

Обобщенные морфометрические характеристики склонов водосборного бассейна р. Локны

Порядок склона	Количество склонов, n		Средняя площадь склона, $F_{\text{ср}}$		Суммарная площадь склонов, $F_{\text{сум}}$		Средняя длина линии тока, $L_{\text{ср}}$		Уклон склона, I		Средняя величина эрозийного фактора рельефа, $LS_{\text{ф ср}}$	
	абс., шт.	отн., %	абс., км ²	ст. откл. ¹ , км ²	абс., км ²	отн., %	абс., м	ст. откл., м	абс.	ст. откл.	абс.	ст. откл.
1	798	62	0.13	0.08	102.1	58	221.9	80.0	0.110	0.076	1.04	0.78
2	277	21	0.13	0.11	36.2	21	288.5	110.6	0.090	0.065	1.49	0.87
3	123	9	0.13	0.12	15.7	9	258.7	100.4	0.113	0.063	1.04	0.90
4	47	4	0.19	0.15	8.9	5	256.7	99.8	0.143	0.061	1.96	0.84
5	51	4	0.23	0.20	11.8	7	315.5	113.8	0.131	0.061	1.98	1.13

Примечание. ¹ – стандартное отклонение.

Таблица 2

Предельные величины ежегодного смыва почвы со склонов водосборного бассейна р. Локны по данным принятой эмпирико-математической модели

Порядок склона	Средний смыв, т/га/год				Суммарный смыв			
	в условиях пара		в условиях типичного севооборота		в условиях пара		в условиях типичного севооборота	
	абс. величина	ст. откл.	абс. величина	ст. откл.	абс. значение, т/год	отн. величина, %	абс. значение, т/год	отн. величина, %
1	38.0	28.12	17.2	13.0	30315.3	53	13716.8	0.50
2	53.3	30.38	24.1	14.0	14765.8	26	6612.1	0.24
3	38.0	32.54	29.4	15.3	4672.7	8	3615.4	0.13
4	71.6	29.69	32.8	13.9	3366.4	6	1542.7	0.06
5	72.6	40.39	33.3	19.1	3701.8	7	1697.6	0.06
Всего					56822		27184.7	

смыва со склонов (табл. 2). Вначале, для исключения влияния особенностей обработки почвы и севооборотов, был рассмотрен максимально возможный потенциальный смыв при постоянном содержании пахотных склонов под паром. Согласно расчетным величинам, средняя величина смыва с пара с элементарной склоновой фасетки составляет 46.2 ± 31.9 т/га/год и возрастает с увеличением порядка (от 38.0 ± 28.1 до 72.6 ± 40.4 т/га/год), что отражает увеличение длин линий тока и крутизны склонов для фасеток более высоких порядков. Для того, чтобы понять реальный вклад склоновой эрозии в баланс вещества в пределах водосборного бассейна, была проведена оценка смыва со склонов находящихся в условиях типичного для этой территории севооборота. Количество наносов со склонов в этом случае сокращается, и величина смыва с элементарной склоновой фасетки колеблется в интервале от 17.2 ± 13.0 до 33.3 ± 19.1 т/га/год.

Оценивался также суммарный смыв со всех склонов определенного порядка (табл. 2). Для бассейна р. Локны в случае полной распашки (по используемой расчетной зависимости) он составляет 56822.0 т/год, а в случае типичного севооборота это значение сокращается до 27184.7 т/год, т. е. более чем в два раза. Структура смыва в процентном соотношении по порядкам остается приблизительно одинаковой как для

пара, так и для типичного севооборота. Со склонов первого порядка (62% от общего числа склонов) поступает в долину 50–53% всего смытого материала (30315.3 т/год), второй порядок дает 24–26%, в то время как последние три порядка дают не более 13% каждый.

Выявив закономерности поведения усредненных величин, целесообразно провести ранжирование эрозионных процессов на склонах водосборного бассейна по всей территории. Для этого были выбраны следующие показатели: а) LS-фактор, б) потенциальная интенсивность смыва почвы с поверхности пашни под паром, в) то же для типичного севооборота.

Значения LS-фактора были разбиты на шесть интервалов с использованием равномерной шкалы с шагом 0.5. Большая часть склонов характеризуется величиной фактора рельефа до 1.5. Это объясняется высокой долей элементарных склоновых фасеток первого, второго и третьего порядков, у которых средняя величина LS-фактора колеблется от 1.0 до 1.5. Около 33% от общего числа элементарных склонов бассейна характеризуются значениями эрозионного фактора рельефа более 1.5, т. е. по геоморфологическим условиям являются наиболее эрозионноопасными.

Для оценки эрозионной опасности использовались интервалы значений смыва из несколько модифицированной классификации М.Н. Заславского [32]. В случае полной распашки территории 77% от общего числа элементарных склоновых фасеток имеют эрозионную опасность, колеблющуюся от очень сильной до крайне катастрофической (свыше 20.1 т/га/год). В то время как в случае с типичным севооборотом происходит снижение числа таковых до 44%.

Расчетные величины предельных значений смыва почвы с элементарных склоновых фасеток были сопоставлены с результатами оценки перераспределения почвы радиоцезиевым методом для двух склоновых профилей, на которых проводились полевые исследования состояния почвы и интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов. Поскольку используемая версия расчетной модели не позволяет оценивать внутрисклоновое переотложение наносов, из исследованных в поле участков склонов были выбраны для сравнительного анализа такие, на которых этот процесс наименее развит в силу особенностей морфологии продольного и поперечного профиля, а также небольшого размера искусственной пахотной террасы (напаша) вдоль нижней границы пашни.

Оказалось, что сходимость результатов расчета по ЭММ и радиоцезиевого метода существенно лучше для более простого короткого рассеивающего склона. Здесь оба метода дают близкие величины средней интенсивности смыва по всей длине склона (13.5 и 11.4 т/га/год) и максимальной интенсивности смыва на склоне (39.9 и 46.4 т/га/год) по ЭММ и по радиоцезиевому методу, соответственно, а также практически идентичную картину изменения интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов вдоль склона. Для более сложного по морфологии длинного выпуклого склона расчетная модель дает более высокие, чем радиоцезиевый метод, значения средней (22.2 против 14.8 т/га/год) и максимальной (53.1 против 46.4 т/га/год) интенсивности смыва. Кроме того, существенно отличается картина изменения интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов вдоль склона.

В целом, сопоставление результатов расчета по модели с радиоцезиевым методом показывает адекватность отображения моделью общей картины изменения интенсивности смыва почвы вдоль склонов, при некотором завышении осредненных по участкам склонов темпов смыва. Это необходимо учитывать при проведении классификации склонов и районирования территории по интенсивности смыва почвы на пахотных склонах на основании расчета по ЭММ. Наиболее близкие к результатам полевых методов расчетные оценки получаются для простых по морфологии склонов. Для более сложных склонов необходима проверка расчетных оценок на ключевых участках для учета вероятного завышения интенсивности смыва. Указанный вывод подтверждается также и результатами ранее проведенных аналогичных сопоставлений для других исследуемых объектов [25–27, 29, 31, 33].

Результаты сравнения величин интенсивности смыва почвы, полученных по ЭММ, с примененными полевыми методами для склонов различной морфологии имеют большое значение для оценки коэффициентов доставки наносов с распаханых водосборных склонов в гидрографическую сеть. Собственно ЭММ не дает возможности составить мнение о доставке наносов, поскольку не позволяет учесть внутрисклоновое переотложение материала. Поэтому оценка коэффициентов доставки должна первоначально проводиться для морфометрически типичных склонов, репрезентативных для исследуемого бассейна, на которых есть возможность сопоставления ЭММ и полевых методов. Полученные величины могут затем быть экстраполированы на всю площадь бассейна на основании морфометрической классификации склонов и расчетов потенциальной интенсивности смыва по ЭММ. В частности, для двух склонов, рассмотренных в данной работе, рассчитанные полевыми методами коэффициенты доставки наносов в днище прилегающего участка долины составили: для короткого выпуклого рассеивающего склона – 96% по радиопециевому и 100% по почвенно-морфологическому методу, для длинного выпуклого склона – 72 и 78%, соответственно. Такие значительные различия связаны с тем, что в первом случае нижняя граница пашни расположена практически в тыловом шве днища долины. Таким образом, весь рыхлый материал, выносимый за пределы пашни, оказывается в днище долины. Во втором же случае нижняя граница пашни отделяется от днища долины участком задернованного склона, на котором переотлагается существенная доля смытого с пашни материала. Полученные величины доставки наносов хорошо согласуются с результатами ранее проведенных исследований для морфологически сходных склонов [23, 24, 26, 27].

Заключение

Из всего сказанного можно сделать следующие выводы:

1. Для оценки геоэкологической ситуации в речных бассейнах гумидных зон с интенсивным сельскохозяйственным освоением целесообразно в качестве методологической базы принимать выявленные Р. Хортоном закономерности в строении водосборного бассейна, теорию единого эрозионно-аккумулятивного процесса Н.И. Маккавеева, а также представления С.М. Шумма, Р.Дж. Чорли, Ю.Г. Симонова о водосборном бассейне как о сложной геоморфологической системе.

2. Эффективное изучение эрозионного потенциала склонов водосборного бассейна возможно при использовании комплексного подхода, включающего морфометрические и прогнозно-модельные методы, с использованием ГИС-технологий, а также метода радиоактивной метки для калибровки моделей смыва. Каждый из методов хорошо зарекомендовал себя при анализе отдельных аспектов решаемой проблемы. Совместное их использование позволяет более широко посмотреть на проблему и получить полную информацию о процессах, происходящих в пределах водосборного бассейна.

3. Выделение в пределах водосбора р. Локны элементарных склоновых фасеток на основе бассейнового анализа показало, что есть четкая закономерность в структуре склонов, которые имеют параметры близкие к модальным. Полученные морфометрические данные позволили оценить эрозионный фактор рельефа склонов и показать возрастание средних его величин от 1 до 2 с увеличением порядка склона. Также удалось оценить величину потенциального смыва почв со склонов в условиях пара и типичного севооборота.

4. Картографирование склонов водосборных бассейнов на основании классификации эрозионного склонового фактора и прогнозной величины смыва почвы со склонов показали, что на данной территории довольно много участков с высокой и очень высокой эрозионной опасностью.

5. С помощью радиоизотопных трассеров удалось установить, что расчетные значения завышают величину смыва (в некоторых местах более чем в 2 раза). Следовательно, необходима доработка модели смыва почв, а с ней и загрязняющих веществ в русло реки, что будет способствовать более адекватной оценке геоэкологической ситуации в изучаемом районе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондарев В.П. Иерархия малых водосборных бассейнов // Геоморфология. 2010. № 2. С. 10–18.
2. Динамическая геоморфология. М.: Изд-во МГУ, 1992. 448 с.
3. Бондарев В.П., Голосов В.Н., Кузнецов П.В. Влияние морфометрических характеристик овражно-балочных систем на перераспределение наносов в их днищах // Геоморфология. 2005. № 2. С. 26–34.
4. Джерард А.Дж. Почвы и формы рельефа. Комплексное геоморфологическое исследование. Л.: Недра, 1984. 208 с.
5. Бондарев В.П., Симонов Ю.Г. Морфометрия склонов овражно-балочных систем европейской части России // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 1999. № 4. С. 48–52.
6. Wishmeier W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of Rocky Mountains. Agric. Handbook. № 282. Washington. 1965. 48 p.
7. Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв. М.: Изд-во МГУ, 1993. 200 с.
8. Renard K., Foster G., Weesies G. et al. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA Agric. Handbook. 1997. V. 703. 384 p.
9. Ларионов Г.А. Разномасштабная оценка и картографирование природной опасности эрозии почв // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 2000. Вып. 12. С. 49–62.
10. Бастраков Г.В., Ларионов Г.А. Эмпирические и полуэмпирические модели эрозии для инженерного обоснования почвозащитных и водоохранных мер // Эрозионные и русловые процессы / М-лы координац. совещ. вузов 1991–1995 гг. М.: Изд-во МГУ, 1996. Вып. 2. С. 12–24.
11. Бобровицкая Н.Н. Эмпирический метод расчета смыва со склонов // Сток наносов, его изучение и географическое распределение. Л.: Гидрометеиздат, 1977. С. 202–211.
12. Инструкция по расчету гидрологических характеристик при проектировании противозерозионных мероприятий. Л.: ВСНОО-ОО, 1982. 52 с.
13. Силантьев А.Н., Шкуратова И.Г. Обнаружение промышленных загрязнений почвы и атмосферных выпадений на фоне глобального загрязнения. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 136 с.
14. Израэль Ю.А., Квасникова Е.В., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Глобальное и региональное радиоактивное загрязнение европейской территории бывшего СССР // Метеорология и гидрология. 1994. № 5. С. 5–9.
15. Атлас радиоактивного загрязнения Европы цезием после Чернобыльской аварии. Люксембург: Офис официальных публикаций Европейской комиссии, 1998. 150 с.
16. Walling D.E., Quine T.A. Calibration of cesium-137 measurements to provide quantitative erosion rate data // Land Degradation and Rehabilitation. 1990. № 2. P. 161–175.
17. Голосов В.Н. Использование радиоизотопов при исследовании эрозионно-аккумулятивных процессов // Геоморфология. 2000. № 2. С. 26–33.
18. Belyaev V.R., Golosov V.N., Kuznetsova J.S., Markelov M.V. Quantitative assessment of effectiveness of soil conservation measures using a combination of ¹³⁷Cs radioactive tracer and conventional techniques. Catena. 2009. V. 79. P. 214–227.
19. Сидорчук А.Ю., Голосов В.Н. Калибровка моделей почвенной эрозии на основе изучения выпадающих из атмосферы радиоизотопов // Почвоведение. 1993. № 7. С. 862–869.
20. Loughran R.J. The use of the environmental isotope cesium-137 for soil erosion and sedimentation studies // Trend in Hydrology. 1994. № 1. P. 149–167.
21. Walling D.E., He Q. Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements // Journ. of Environmental Quality. 1999. № 28. P. 611–622.
22. Острова И.В., Силантьев А.Н., Литвин Л.Ф. и др. Оценка интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов по содержанию в почве цезия-137 // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 1990. № 5. С. 79–85.
23. Panin A.V., Walling D.E., Golosov V.N. The role of soil erosion and fluvial processes in the post-fallout redistribution of Chernobyl-derived cesium-137: a case study of the Lapki catchment, Central Russia // Geomorphology. 2001. V. 40. P. 185–204.
24. Беляев В.Р., Маркелов М.В., Голосов В.Н. и др. Использование ¹³⁷Cs для оценки современной агрогенной трансформации почвенного покрова в районах чернобыльского загрязнения // Почвоведение. 2003. № 7. С. 876–891.
25. Беляев Ю.Р., Беляев В.Р., Голосов В.Н., Маркелов М.В. Особенности трансформации рельефа малого освоенного водосбора северо-запада Русской равнины за период агрикультурного освоения // Геоморфология. 2004. № 1. С. 50–63.

26. Кузнецова Ю.С., Беляев В.Р., Маркелов М.В., Иванова Н.Н. Анализ пространственно-временной неоднородности эрозионно-аккумулятивных процессов на пахотном склоне (часть 1) // Геоморфология. 2007. № 1. С. 71–84.
27. Кузнецова Ю.С., Беляев В.Р., Маркелов М.В., Иванова Н.Н. Анализ пространственно-временной неоднородности эрозионно-аккумулятивных процессов на пахотном склоне (часть 2) // Геоморфология. 2007. № 2. С. 60–69.
28. Ritchie J.C., McHenry J.R. Application of radioactive fallout cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns / J. Environ. Qual. 1990. V. 19. P. 215–233.
29. Belyaev V.R., Wallbrink P.J., Golosov V.N. et al. A comparison of methods for evaluating soil redistribution in the severely eroded Stavropol region, southern European Russia // Geomorphology. 2005. V. 65. P. 173–193.
30. Литвин Л.Ф., Голосов В.Н., Добровольская Н.Г. и др. Перераспределение ^{137}Cs процессами водной эрозии почв // Водные ресурсы. 1996. Т. 23. № 3. С. 314–319.
31. Иванова Н.Н., Голосов В.Н., Маркелов М.В. Сопоставление методов оценки интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов на обрабатываемых склонах // Почвоведение. 2000. № 7. С. 898–906.
32. Заславский М.Н. Эрозия почв. М.: Мысль, 1979. 246 с.
33. Кузнецова Ю.С., Беляев В.Р., Голосов В.Н. Влияние детальности исходной информации о рельефе на точность расчетов темпов смыва почв со склонов // Геоморфология. 2011. № 4. С. 46–57.

Московский государственный университет
 Географический факультет,
 Лаборатория наук о климате и окружающей
 среде НЦНИ Франции, Жив Сюр Иветт

Поступила в редакцию
 27.01.2012

SEDIMENT DELIVERY FROM INTERFLUVE SLOPES INTO RIVER VALLEY

V.P. BONDAREV, V.R. BELYAEV, N.N. IVANOVA, O. EVRARD

Summary

A complex approach for estimation of sediment delivery ratios is proposed. The method includes morphometric analysis of drainage basins, mathematical modelling and application of radioactive tracer. The approach effectiveness is demonstrated by analysis of drainage basin slopes of the Lokna River (Central Part of the European Russia). Morphometric data are collected, LS-factor for cultivated hillslopes is calculated and the value of potential sediment delivery from hillslopes to river valley under conditions of no-crop fallow and typical crop rotation is estimated. Morphometric mapping of the drainage basin slopes allowed determining areas with high and very high erosion potential. Application of radioactive tracer made it possible to validate the model output and formulate some ways to improve the approach.

УДК 551.4.013

© 2014 г. К.А. МАЛЬЦЕВ, О.П. ЕРМОЛАЕВ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОСТРОЕНИЯ ГРАНИЦ ВОДОСБОРОВ¹

Введение

Цифровые модели рельефа (ЦМР), в основе которых лежат регулярные координатные сетки, в настоящее время широко используются специалистами, работающими в самых разных направлениях географии и геоморфологии. Востребованность данных материалов во многом определяется все большей доступностью данных моделей, глобальностью охвата территории Земли, возможностью использовать различные уровни генерализации и оперативностью решения с их помощью различных задач, требующих количественного подхода.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Всероссийской общественной организации “Русское географическое общество” (проект № 13-05-41126-а) и РФФИ (проект № 14-05-00503).